



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Eléctrica

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Localización de fuentes de descargas parciales  
mediante optimización por enjambre de partículas**

Autor:

Lidia Rosado Ruiz

Tutor:

Dr. D. Guillermo Robles Muñoz

Leganés, Junio 2015



## **Agradecimientos**

Durante estos años de carrera ha sido de gran importancia el apoyo recibido por parte de mis padres, mi hermana y Alberto, siempre animándome y ayudando en todo lo posible y más.

También quiero agradecer a mi tutor de proyecto Guillermo Robles la dedicación y paciencia que me ha ofrecido desde el primer día que fui a su despacho. Siempre disponible cuando surgían problemas y siempre dispuesto a solucionarlos.

Por último, no quiero olvidarme de mis sobrinas Martina y Valeria, la energía y alegría que me transmiten es increíble. Sin duda, son capaces de hacerte desconectar después de días bastante intensos de trabajo.

## Resumen

En este trabajo se lleva a cabo la medición de la radiación producida por el fenómeno de las descargas parciales en ultra alta frecuencia (UHF). Para registrar estas emisiones electromagnéticas se emplean antenas dispuestas en dos configuraciones diferentes a lo largo de todo el estudio.

El principal objetivo es localizar la fuente que emite las descargas parciales empleando como método la optimización por enjambre de partículas. Este método iterativo se basa en imitar los movimientos que realizan determinados animales como las abejas en la naturaleza para calcular la solución buscada. Hasta alcanzar este objetivo, se recorren varios pasos intermedios analizando qué factores pueden afectar de forma directa a la localización. Algunos de los factores estudiados están relacionados con el cálculo de los tiempos de llegada de la descarga parcial a cada una de las antenas o con la posición que presenten las antenas respecto a la fuente.

En último lugar, se analizan los factores de los que depende el algoritmo de optimización utilizado con el fin de alcanzar la posición de la fuente en el menor número de iteraciones posible.

## **Abstract**

This project is about the measurement of the radiation produced by the phenomenon of partial discharges in ultra-high frequency (UHF). Several antennas, arranged in two different configurations throughout the study, are used to record these electromagnetic emissions.

The aim is locating the source which emits partial discharges using the method of particle swarm optimization (PSO). This iterative method is based on the imitation of the movements made by certain insects like bees, in nature, in order to calculate the expected solution. To achieve this goal, several intermediate steps are taken analyzing what factors could directly affect the location of the source. Some of the studied factors are related to the calculation of partial discharge arrival times to each of the antennas or to the relative position that the antennas have from the source.

Finally, the some parameters of the PSO algorithm are analyzed so as to reach the position of the source in the least possible iterations.

## Índice

Índice de figuras .....	8
Índice de tablas .....	11
Capítulo 1. Introducción.....	12
1.1    Introducción a las descargas parciales .....	12
1.2    Objetivos del trabajo.....	15
Capítulo 2. Localización de la fuente de descargas parciales dentro de un volumen acotado.....	16
2.1. Análisis de los TDOAs de las señales .....	16
2.2. Análisis del Código 1 .....	20
Capítulo 3. Estudio de la posición de la configuración de antenas respecto a la fuente de descargas parciales.....	26
3.1 Análisis del problema a resolver .....	26
3.2. Distribución cuadrada de antenas.....	27
3.3. Distribución triangular de antenas.....	35
3.4. Análisis de los resultados.....	41
Capítulo 4. Representación en tres dimensiones de las máximas desviaciones de TDOAs .....	43
4.1. Desplazamiento a través de una superficie .....	43
4.2. Representación de una superficie .....	43
4.3. Resultados para la distribución cuadrada de antenas.....	44
4.4. Resultados para la distribución triangular de antenas.....	51
Capítulo 5. Métodos para el cálculo de TDOAs teóricos .....	57
5.1 Método de la energía con pendiente negativa .....	57
5.1.1 El ruido electromagnético .....	59
5.2. Correlación de señales .....	60
5.2.1 Correlación cruzada con Matlab.....	61
Capítulo 6. Optimización por enjambre de partículas.....	66
6.1 Descripción del método.....	66
6.2 Modelo global (GBEST).....	69
6.2.1 Explicación del código 7.....	70
6.3 Modelo local (LBEST) .....	77
Capítulo 7. Modificación de factores en PSO .....	78
7.1 Factores variables en PSO .....	78
7.2 Casos planteados .....	79

7.2.1 Representación de los casos planteados .....	79
7.3 Simulación de un caso real .....	86
Capítulo 8. Medida de TDOAs reales .....	88
8.1 Descripción de elementos usados en el laboratorio .....	88
8.2 Localización de la fuente de DPs mediante PSO .....	90
8.3 Dispersión en la localización de la fuente de DPs.....	94
Conclusiones .....	100
Trabajos futuros.....	102
Anexo 1 .....	103
Bibliografía.....	128

## Índice de figuras

Figura 1. Disposición de la configuración de antenas y de la fuente de DPs. ....	16
Figura 2. Desplazamiento realizado por el cubo en el código 1. ....	22
Figura 3. Valores de la matriz C para el par de antenas 1-2 acotando el error de posición con un cubo cuyas aristas miden 0,2 m. ....	24
Figura 4. Valores de la matriz C para el par de antenas 1-2 acotando el error de posición con un cubo cuyas aristas miden 0,4 m. ....	25
Figura 5. Fuente de DPs atravesando la distribución cuadrada. ....	27
Figura 6. Superposición de curvas para el par de antenas 1-2 de la distribución cuadrada. ....	28
Figura 7. Posición de la fuente de DPs correspondiente al máximo de la curva roja de la figura 6. ....	29
Figura 8. Posiciones de la fuente de DPs divididas por colores en función de si es mejor que se encuentre exterior o interior a la distribución de antenas. ....	30
Figura 9. Superposición de curvas para el par de antenas 1-3 de la distribución cuadrada. ....	31
Figura 10. Superposición de curvas para el par de antenas 1-4 de la distribución cuadrada. ....	32
Figura 11. Superposición de curvas para el par de antenas 2-3 de la distribución cuadrada. ....	33
Figura 12. Superposición de curvas para el par de antenas 2-4 de la distribución cuadrada. ....	34
Figura 13. Superposición de curvas para el par de antenas 3-4 de la distribución cuadrada. ....	35
Figura 14. Fuente de DPs atravesando la distribución triangular de antenas. ....	36
Figura 15. Fuente de DPs exterior a la distribución triangular de antenas. ....	37
Figura 16. Superposición de curvas para el par de antenas 1-2 de la distribución triangular. ....	38
Figura 17. Superposición de curvas para el par de antenas 1-3 de la distribución triangular. ....	39
Figura 18. Superposición de curvas para el par de antenas 1-4 de la distribución triangular. ....	39
Figura 19. Superposición de curvas para el par de antenas 2-3 de la distribución triangular. ....	40
Figura 20. Superposición de curvas del par de antenas 2-4 de la distribución triangular. ....	40
Figura 21. Superposición de curvas para el par de antenas 3-4 de la distribución triangular. ....	41
Figura 22. Máximos de C registrados desde $y=0$ hasta $y=1m$ . ....	42
Figura 23. Superficie recorrida por la fuente en el interior de la distribución cuadrada de antenas. ....	44
Figura 24. Representación en superficie de C para el par de antenas 1-2 de la distribución cuadrada. ....	45
Figura 25. Representación en superficie de C para el par de antenas 1-3 de la distribución cuadrada. ....	46
Figura 26. Representación en superficie de C para el par de antenas 1-4 de la distribución cuadrada. ....	47
Figura 27. Representación en superficie de C para el par de antenas 2-3 de la distribución cuadrada. ....	47
Figura 28. Representación en superficie de C para el par de antenas 2-4 de la distribución cuadrada. ....	48
Figura 29. Representación en superficie de C para el par de antenas 3-4 de la distribución cuadrada. ....	49
Figura 30. Representación en superficie de C para el conjunto de los pares de antenas de la distribución cuadrada. ....	50



Figura 31. Máximos valores de C en la representación en superficie para el conjunto de los pares de antenas de la distribución cuadrada. ....	51
Figura 32. Superficie recorrida por la fuente en la distribución triangular de antenas.....	52
Figura 33. Representación en superficie de C para el par de antenas 1-2 de la distribución triangular.. ....	52
Figura 34. Representación en superficie de C para el par de antenas 1-3 de la distribución triangular. ....	53
Figura 35. Representación en superficie de C para el par de antenas 1-4 de la distribución triangular.. ....	53
Figura 36. Representación en superficie de C para el par de antenas 2-3 de la distribución triangular.. ....	54
Figura 37. Representación en superficie de C para el par de antenas 2-4 de la distribución triangular.. ....	54
Figura 38. Representación en superficie de C para el par de antenas 3-4 de la distribución triangular.. ....	55
Figura 39. Representación en superficie de C para el conjunto de los pares de antenas de la distribución triangular.. ....	56
Figura 40. Curva ECK de una señal. ....	58
Figura 41. Espectro del ruido electromagnético. ....	60
Figura 42. Señales creadas para el cálculo de TDOAs.....	62
Figura 43. Correlación cruzada para el cálculo de t12.. ....	63
Figura 44. Correlación cruzada para el cálculo de t13. ....	64
Figura 45. Correlación cruzada para el cálculo de t23. ....	64
Figura 46. Enjambre de abejas.....	67
Figura 47. Bandada de aves. ....	67
Figura 48. Diagrama de flujo de PSO. ....	68
Figura 49. Distribución de la configuración de antenas empleada.. ....	69
Figura 50. Señales creadas en Matlab para calcular los TDOAs de las cuatro antenas.. ....	73
Figura 51. Enjambre de partículas recorriendo el espacio de soluciones. ....	75
Figura 52. Solución encontrada por la partícula <i>p<sub>mejor</sub></i> . ....	76
Figura 53. Número de iteraciones para el caso 3. ....	80
Figura 54. Iteración para la que el caso 3 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. ....	80
Figura 55. Número de iteraciones para el caso 4. ....	81
Figura 56. Iteraciones para las que el caso 4 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. ....	81
Figura 57. Número de iteraciones para el caso 5. ....	82
Figura 58. Iteraciones para las que el caso 5 se aproxima al valor nulo de la función objetivo.. ....	82
Figura 59. Número de iteraciones para el caso 9. ....	83
Figura 60. Iteraciones para las que el caso 9 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. ....	83
Figura 61. Número de iteraciones para el caso 12.. ....	84
Figura 62. Iteraciones para las que el caso 12 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. ....	84
Figura 63. Número de iteraciones para el caso 10. ....	85
Figura 64. Iteraciones para las que el caso 10 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. ....	85
Figura 65. Número de iteraciones realizadas en la simulación real.. ....	87

Figura 66. Iteraciones para las que la simulación real se aproxima al valor nulo de la función objetivo.....	87
Figura 67. Disposición de las antenas y la fuente en el laboratorio. ....	88
Figura 68. Sección de la unión entre el cable y el hilo de cobre. ....	89
Figura 69. Simulación de la disposición de las antenas y de la fuente.....	90
Figura 70. Señales registradas en el osciloscopio 100ns. ....	91
Figura 71. Señales de las cuatro antenas en fase 1ns. ....	92
Figura 72. Señales desfasadas de las cuatro antenas 1 ns. ....	93
Figura 73. Esquema de los casos estudiados. ....	95
Figura 74. Ensayo con la fuente en la diagonal 1. ....	96
Figura 75. Antenas rodeando a la fuente de DPs (centro). ....	96
Figura 76. Fuente situada en la diagonal 1. ....	97
Figura 77. Fuente situada en la diagonal 2. ....	97
Figura 78. Fuente situada en la diagonal 3. ....	98

## Índice de tablas

Tabla 1. Ejemplo de una fila extraída de la matriz $C$ . .....	19
Tabla 2. Matriz $dTDOA$ formada por 27 filas. ....	23
Tabla 3. Primera fila de la matriz $C$ formada a partir de la matriz $dTDOA$ . ....	23
Tabla 4. Casos calculados variando los factores de inercia y de corrección de PSO. ....	79

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Introducción a las descargas parciales

Los materiales aislantes desempeñan funciones muy importantes en las máquinas eléctricas, especialmente en las que están sometidas a alta tensión, tales como «canalizar corrientes eléctricas, evitar la fuga de corrientes indeseadas, permitir la diferencia de potencial entre las partes activas y la tierra y mantener la estabilidad térmica de la máquina». [Cortes Cherta 1994: 19]. En definitiva, el buen estado del aislante determina la vida útil de la máquina.

Cuando se deteriora el aislante por la aparición de huecos, burbujas o pequeñas rupturas, se produce el fenómeno eléctrico conocido como descargas parciales (DPs). Este fenómeno pulsante que tiene lugar en un medio gaseoso, consiste en una ruptura eléctrica producida en una pequeña zona del aislante cuando se somete a alta tensión entre dos conductores. Las DPs presentan una naturaleza estocástica, desconociéndose el tiempo que transcurre desde que se producen hasta que son registradas. [Linealt 2008] La duración se trata de un aspecto crítico a la hora de registrar y estudiar este fenómeno. Los pulsos de DPs se caracterizan por una breve duración de, aproximadamente, unos 3 a 300 nanosegundos. Como consecuencia, son necesarios aparatos con un ancho de banda entre 1-1000 MHz para su detección. En concreto, este ancho de banda se corresponde con el rango de frecuencias VHF (*Very High Frequency*) entre 30-300 MHz y UHF (*Ultra High Frequency*) entre 300-3000 MHz.

La medición de DPs es un modo de evaluar el estado del aislamiento de las máquinas eléctricas, pudiéndose distinguir dos modos de medición en el espectro de radiofrecuencia (RF). Por un lado, los sensores empleados para la adquisición de DPs se pueden conectar a un osciloscopio con el fin de medir los pulsos en tiempo. Por otro lado, también es posible conectar los sensores a un analizador de espectros para registrar los pulsos en frecuencia. En particular, en este trabajo se han empleado antenas como sensores para adquirir DPs en la banda de UHF, midiendo los pulsos de este fenómeno en el tiempo mediante un osciloscopio.

Las técnicas de medición en UHF presentan ventajas muy importantes como permitir adquirir DPs sin necesidad de que exista contacto con el activo eléctrico. Esto hace posible que las máquinas sigan en funcionamiento sin necesidad de alterar su

servicio para llevar a cabo análisis del estado de su aislamiento. Las DP's se tratan de un fenómeno muy amplio que pueden ser detectadas por diferentes tipos de emisiones: luminosas, electromagnéticas, acústicas,... En este trabajo, se emplean como sensores antenas UHF para registrar las señales electromagnéticas producidas por las mismas. En el artículo escrito por Markalous et al. en 2008, se explica cómo localizar los fallos en transformadores empleando sensores piezoeléctricos capaces de medir las señales acústicas producidas. [Markalous: 1582] Otra ventaja consiste en la obtención de buenos resultados en la localización de la fuente de DP's independientemente del tipo de material aislante. Como ejemplo, cabe destacar la localización llevada a cabo en subestaciones aisladas por aire. [Albarracín Sánchez 2014: 3-5]

Sin embargo, estas técnicas de medición también presentan ciertas desventajas como que el hecho de adquirir DP's en la distancia provoca la pérdida de la referencia, suponiendo el desconocimiento del tipo de la descarga parcial registrada. También resulta complicado clasificar las DP's por culpa de la presencia de un cierto nivel de ruido electromagnético durante las mediciones.

Lo ideal sería que las máquinas funcionasen en ausencia de DP's pero, inevitablemente, esto no sucede así. Por lo tanto, resulta necesario detectarlas y localizar la fuente que las produce para resolver el problema y minimizar futuras consecuencias. Las emisiones producidas por DP's en radio frecuencia junto con la localización de las fuentes emisoras se llevan analizando desde hace años en profundidad. El hecho de poder localizar dónde se encuentra el fallo de un sistema presenta ventajas muy relevantes. Como una de las ventajas principales, el factor tiempo se traduce en ahorro económico a la hora de reducir la duración de cortes en sistemas como subestaciones eléctricas para solucionar los problemas.

Como una aplicación de la importancia que supone la posición de las antenas respecto a la fuente, se puede retomar el ejemplo de localización de problemas en activos eléctricos dentro de una subestación aislada por aire. En esta situación, se sospecha que algún elemento pueda estar próximo al fallo pero se desconoce entre todos ellos cuál puede ser. El modo de poder resolver el problema y de garantizar el suministro eléctrico, sería comenzar rodeando mediante antenas la zona en la que se sospecha que se pueda encontrar el elemento. Estudiando los resultados que se van obteniendo, paso a paso, se iría acotando la zona hasta poder localizar la fuente de DP's (la máquina que está fallando).

En los transformadores también se aplican estos conocimientos sobre la posición que deben presentar las antenas respecto a la fuente en el proceso de localización, colocando durante los ensayos, los sensores piezoeléctricos alrededor de la carcasa del transformador. [Markalous 2008: 1582]

Este trabajo tiene como motivación seguir avanzando y aportando conocimientos sobre un tema tan relevante e impredecible como es el de las descargas parciales. Se parte de una problemática presente en estudios previos relacionada con la localización

concreta de la fuente de DPs. Para un mismo error en el cálculo de diferencias de tiempo de llegada de las DPs es crítica la posición entre las antenas y la fuente, aspecto que se va a demostrar en este trabajo.

En definitiva, este estudio se centra en buscar una disposición óptima de las antenas con el fin de obtener buenos resultados en la localización de la fuente de DPs. Teniendo siempre presente que las diferencias de tiempo de llegada de las DPs a las antenas no son correctas debido a los errores inevitables cometidos en su cálculo. El motivo de estos errores se debe a que las señales analizadas son no ideales y ruidosas. Además, se conoce que para pequeños errores cometidos en el cálculo de estas diferencias de tiempo, se pueden obtener grandes errores en la localización de la fuente. Como solución a este problema, se pretende encontrar una disposición de antenas para la cual se minimicen las consecuencias de trabajar con estas diferencias de tiempo incorrectas, es decir, ubicar la fuente cometiendo el menor error de posición posible.

## 1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo se centra en la localización de la fuente de DPs empleando el método de optimización por enjambre de partículas, o bien PSO (*Particle Swarm Optimization*). Con base en este objetivo principal se abordan los siguientes objetivos intermedios:

- Averiguar el máximo error a cometer en el cálculo de TDOAs para localizar la fuente de DPs habiendo acotado el error de posición.

- Estudiar si la posición existente entre las antenas y la fuente influye en cierta medida en la localización de la fuente. Se emplea una configuración cuadrada de antenas y otra triangular.

- Calcular diferencias de tiempo de llegada de las DPs mediante códigos implementados en el programa Matlab.

- Explicar métodos para obtener las diferencias de tiempo de llegada de las DPs teóricas entre señales.

- Comprobar el desempeño del PSO en función de sus parámetros de inercia y factor de corrección.

- Adquirir DPs en el laboratorio mediante cuatro antenas que miden las emisiones electromagnéticas originadas en la banda de ultra alta frecuencia.

- Examinar la dispersión obtenida en la localización de la fuente de DPs para diferentes posiciones de la fuente respecto a las antenas.

## Capítulo 2

### Localización de la fuente de descargas parciales dentro de un volumen acotado

#### 2.1. Análisis de los TDOAs de las señales

Este capítulo explica cómo llevar a cabo la localización de la fuente de DPs dentro de un volumen establecido conociendo la diferencia entre tiempos de llegada de una misma perturbación a diferentes antenas, es decir, a través del cálculo de TDOAs (*Time Difference of Arrival*).

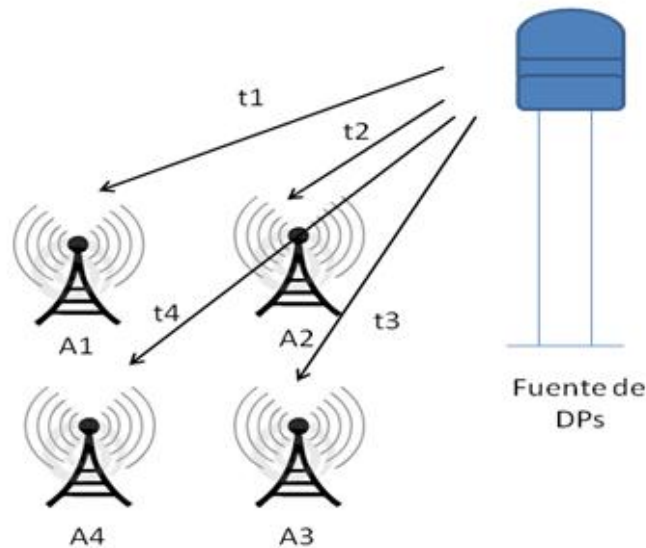


Figura 1. Disposición de la configuración de antenas y de la fuente de DPs. Fuente propia

En la figura 1, se muestra una configuración formada por cuatro antenas denominadas A1, A2, A3 y A4. Los tiempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  y  $t_4$  se corresponden con el tiempo que tarda cada antena en registrar la DP o bien, con el tiempo que tarda la DP en recorrer la distancia existente entre la fuente y la respectiva antena. Estos tiempos absolutos son conocidos como TOAs (*Time of Arrival*). La diferencia entre estos



tiempos proporciona el desfase existente en la recepción de una misma perturbación por parte de dos antenas diferentes, es decir, el TDOA. Para el ejemplo de la configuración cuadrada de la figura 1, hay seis TDOAs que se calculan tal y como se indica en la ecuación (1).

$$t_{ij} = t_i - t_j \quad (1)$$

$$t_{12} = t_1 - t_2$$

$$t_{13} = t_1 - t_3$$

$$t_{14} = t_1 - t_4$$

$$t_{23} = t_2 - t_3$$

$$t_{24} = t_2 - t_4$$

$$t_{34} = t_3 - t_4$$

Una vez conocido el valor de estas diferencias de tiempos en la recepción de las DPs por parte de las antenas, es posible conocer la distancia existente entre todas ellas. Basta con multiplicar estas diferencias de tiempo por la velocidad de propagación del medio (aire) para obtener la distancia entre las diferentes antenas. Durante este trabajo se emplean códigos implementados en el programa Matlab para llevar a cabo el cálculo de los TDOAs, calculados siempre como distancias medidas en metros.

En función de las dimensiones en las que se quiera realizar la localización de la fuente de DPs, se debe variar el número de antenas empleadas. Para conocer las tres coordenadas en las que se ubica la fuente, se deben emplear como mínimo cuatro antenas en la distribución, tal y como ocurre en la figura 1. De este modo, se obtienen tres ecuaciones con tres incógnitas, justo las que corresponden a estas coordenadas. La ecuación (2) se trata de la ecuación empleada para resolver la localización la fuente.

$$c \cdot (t_a - \tau) = \sqrt{(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 + (z - z_a)^2} \quad (2)$$

Esta ecuación indica que la distancia geométrica entre dos puntos es la misma que la obtenida al multiplicar la velocidad del medio de propagación por el tiempo [Moore 2005: 2267]. Los subíndices “a” hacen referencia a las antenas y las incógnitas son tanto las coordenadas de la fuente de DPs (x, y, z) como  $\tau$  (instante desconocido en el que empezó la propagación de la descarga parcial). Los tiempos en los que cada antena registra la DP se identifican como  $t_1, t_2, t_3$  y  $t_4$ , estos tiempos son absolutos y no son de gran utilidad puesto que se desconoce el instante de tiempo  $\tau$  en el que se produjo la DP. Como solución a este problema que afecta a la primera igualdad de la ecuación anterior ( $t_a$ ), se toman como referencia los tiempos de dos puntos cuyas coordenadas sean conocidas para obtener unos tiempos relativos que informan sobre el anticipo o retraso con el que registran la DP unas antenas respecto a otras. Estos

tiempos relativos son los TDOAs y en la ecuación (3) se muestra el modo de cancelar la incógnita  $\tau$ .

$$t_{ij} = (t_i - \tau) - (t_j - \tau) = t_i - t_j \quad (3)$$

Finalmente, si se aplica la ecuación (3) a la ecuación principal de la localización (2), se obtienen las tres ecuaciones necesarias de resolver (4), (5) y (6) para conocer la ubicación de la fuente.

$$c \cdot ((t_1 - \tau) - (t_2 - \tau)) = c \cdot t_{12} = d_1 - d_2 \quad (4)$$

$$c \cdot ((t_1 - \tau) - (t_3 - \tau)) = c \cdot t_{13} = d_1 - d_3 \quad (5)$$

$$c \cdot ((t_1 - \tau) - (t_4 - \tau)) = c \cdot t_{14} = d_1 - d_4 \quad (6)$$

siendo:

$$d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \quad (7)$$

$$d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \quad (8)$$

$$d_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} \quad (9)$$

$$d_4 = \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} \quad (10)$$

Para alcanzar la solución de este sistema formado por las ecuaciones (4), (5) y (6) es necesario emplear métodos iterativos debido a la no linealidad de las ecuaciones. Algunos de los métodos iterativos utilizados son Newton-Raphson, el método de mínimos cuadrados o el método desarrollado en este trabajo, optimización por enjambre de partículas. Además, otro aspecto que complica la obtención de la posición de la fuente lo más exacta posible, está relacionado con el cálculo de los parámetros fundamentales de esta ecuación, los TDOAs. Esto se debe a que en la fase de toma de medidas es inevitable la presencia de errores relacionados con diferentes aspectos como la frecuencia de muestreo y las características propias de las señales. Sin olvidar los errores relacionados con la discretización de la señal porque se trabaja con tiempos discretos y no continuos.

Por un lado, una frecuencia de muestreo pequeña reduce el número de muestras registradas por unidad de tiempo. Particularmente, el valor de la máxima frecuencia de muestreo disponible en el laboratorio es de 10 GS/s. Un aumento de la frecuencia de muestreo supondría una gran inversión en nuevos equipos.

Por otro lado, la toma de medidas de la forma más exacta posible se ve dificultada al trabajar con señales no ideales. Como por ejemplo, el cálculo del instante en el que se registra un impulso conlleva ciertos errores a la hora de medir el valor.

Lo ideal sería estudiar cómo se propaga el error cometido en la medida de TDOAs en el error de localización de la fuente pero, debido a la no linealidad de la ecuación de localización y a la complejidad que esto supone en los cálculos, se ha abordado este problema desde el punto de vista contrario a lo largo de este capítulo. Se busca conocer cuál es el máximo error a cometer en el cálculo de los TDOAs que permita localizar la fuente sin superar un error de posición establecido. Con el fin de acotar el error de posición a cometer, se crea un cubo formado por diferentes fuentes de DPs alrededor de una fuente central, cuyas coordenadas son  $(xf_0, yf_0, zf_0)$ .

Las características de este cubo es conveniente ajustarlas bien porque su tamaño queda definido por el error de posición con el que se desea trabajar. Por lo tanto, si se desea conseguir una localización lo más precisa posible, sus aristas deben medir un valor pequeño para trabajar con un error de posición mínimo. De este modo, los errores máximos a cometer en el cálculo de los TDOAs también dependen del tamaño del cubo. Cuanto mayor sea el cubo (mayor error de posición permitido), mayor serán los errores a cometer en el cálculo de las diferencias de tiempo.

Continuando con la explicación del cubo, la fuente central se toma como referencia para el resto; puesto que se trataría de la solución si todo el proceso de medidas fuese ideal y no se cometiesen errores. Por ello, se calcula la diferencia entre los TDOAs obtenidos para las fuentes candidatas y los TDOAs obtenidos para la fuente central denominados TDOA0. Esta desviación se identifica en el resto del capítulo como dTDOA.

Una vez establecido el cubo de fuentes de DPs, se desplaza en una dirección determinada con el fin de registrar los dTDOAs para todas las posiciones recorridas. Los dTDOAs máximos permiten conocer el mayor error de localización que es posible cometer para cada posición del cubo en sus diferentes desplazamientos.

Con el fin de conocer para cada posición de la fuente la sensibilidad en el error de cálculo de los TDOAs de cada par de antenas, se guardan los dTDOAs máximos en una matriz denominada C. Si se superan los valores de esta matriz para alguno de los pares de antenas correspondientes a una posición concreta del cubo, no se puede garantizar que la fuente de DPs se encuentre dentro del volumen de soluciones posibles establecida (cubo). Esta idea se comprende de forma más clara mediante un ejemplo numérico. En la tabla 1 se muestra una de las filas que formarían la matriz C para una posición determinada de la fuente.

C = 0.019      0.032      0.041      0.054      0.023      0.025

Tabla 1. Ejemplo de una fila extraída de la matriz C.

Cada uno de los valores se corresponde con el máximo dTDOA de cada uno de los pares de antenas de la distribución. Por ejemplo, en este caso el primer valor de 0,019 m se corresponde con el máximo dTDOA del par de antenas 1-2, el segundo valor de 0,032 m con el del par de antenas 1-3, el tercero con el del par de antenas 1-4, el cuarto con el del par de antenas 2-3, el quinto con el del par de antenas 2-4 y el sexto con el del par de antenas 3-4. Suponiendo que esta fila extraída de la matriz  $C$  se corresponde con los resultados obtenidos para una determinada posición de la fuente central  $(xf_0, yf_0, zf_0)$ , se puede afirmar que si para esa posición de la fuente cualquier error en los TDOA supera uno de los valores registrados para cada par de antenas, ya no se puede garantizar que la fuente se encuentre dentro del cubo. Esto implicaría que no se habría sido capaz de llevar a cabo la localización dentro de los errores de posición previamente acotados.

Retomando el ejemplo numérico anterior, si las medidas de los máximos dTDOAs para el par de antenas, por ejemplo, 2-3 fuesen mayores que las registradas en la matriz  $C$  (0,054 m) para esta posición concreta de la fuente, no se podría asegurar que la fuente se encontrase dentro del error de posición acotado mediante el cubo.

También se puede detectar el par de antenas más crítico para cada posición del cubo comparando los valores entre los diferentes pares de antenas. El par de antenas más crítico tendrá el menor valor de  $C$  entre todos los obtenidos para todos los pares de antenas de esta posición. Se trata del valor más peligroso porque si se cometen errores en la medición para ese par de antenas y se supera este valor, ya no se puede garantizar que la fuente esté dentro del cubo. Por ello, se puede afirmar que del valor más crítico depende que se pueda localizar la fuente dentro de la zona acotada. En el ejemplo anterior de la fila extraída de la matriz  $C$ , el par de antenas crítico sería el par 1-2 por presentar el menor valor entre todos los demás, 0,019 m.

Como resultado de este estudio, se reitera que no se busca conocer qué punto concreto de todos los que forman el cubo se corresponde con la fuente de descargas parciales, sino que es suficiente con garantizar que la fuente esté dentro del cubo. El interés principal consiste en identificar la posición de la fuente para la que el error en el cálculo de los TDOAs es menos sensible para poder localizar la fuente sin superar el error de posición establecido.

## 2.2. Análisis del Código 1

En este capítulo, el código 1 recoge todas las ideas explicadas en el apartado anterior para poder localizar la fuente de DPs dentro del cubo. Gracias a él es posible analizar cómo varía el error de localización que es factible cometer para diferentes situaciones como diferentes distribuciones de antenas o diversas posiciones del cubo.

Este código se puede implementar para cualquier tipo de distribución de antenas. Únicamente se debería sustituir la posición actual de la distribución cuadrada establecida por cualquier otra. Las cuatro antenas deben tener definidas sus coordenadas en las tres dimensiones.

A continuación, se detallan los bucles y variables que forman el código:

En el primer bucle `for` se va incrementando  $yf_0$  para indicar que se produce un desplazamiento a lo largo de la dirección  $y$ , manteniendo fijas el resto de coordenadas de la fuente central. Este movimiento de la fuente central es el encargado de mover todo el cubo.

Para estas diferentes coordenadas de la fuente central que varían con el bucle `for`, se calculan las distancias existentes entre las diferentes antenas A1, A2, A3 y A4 y la fuente central, guardando estos datos en el vector denominado TDOA0.

Tal y como se indicó anteriormente, un TDOA indica la diferencia de tiempo existente entre cada par de antenas a la hora de registrar la misma DP. Esta diferencia de tiempo también se puede calcular como distancia haciendo uso de la velocidad del medio de propagación, siendo esta última opción la empleada para el cálculo de TDOAs en este trabajo. Como ejemplo, calculando el desfase  $d_1-d_2$  se conoce el retraso o la antelación con la que la antena 2 registra la DP respecto a la antena 1 medido en metros.

En el segundo bucle `for`, se crea el cubo formado por las diferentes fuentes de DPs alrededor de la fuente central. Debido a que se pretende llevar a cabo una localización de la fuente de DPs lo más precisa posible, se establecen unos valores pequeños para las dimensiones del cubo. Su tamaño se define mediante los parámetros `paso` y `er`, los cuales indican cada cuanto distancia se coloca una nueva fuente de descargas parciales. En este código estas variables tienen un valor de 0,1 metros, lo que supone una longitud total de la arista del cubo de 0,2 metros.

Para obtener las coordenadas de cada posible fuente que forma el cubo, se emplea otro bucle `for` en  $i$ , en  $j$  y en  $k$ . Como se indicó previamente para la fuente central, se obtienen los TDOAs para el resto de fuentes en el interior de este bucle. Además, el siguiente paso consiste en calcular las desviaciones ( $dTDOAs$ ) tomando como referencia los desfases obtenidos respecto a la fuente central.

En relación al desplazamiento del cubo, en el código se mueve desde  $yf_0 = -3$  m hasta  $yf_0=3$  m en incrementos de 0,1 m. Este movimiento del cubo de fuentes de descargas parciales (FDP) se muestra en la figura 2 junto a la situación que presentan las cuatro antenas empleadas, las cuales forman una distribución cuadrada. El contador `kk` alcanza el valor 61, lo cual implica que la matriz  $dTDOA$  se calcula 61 veces cada vez que se ejecuta el programa.

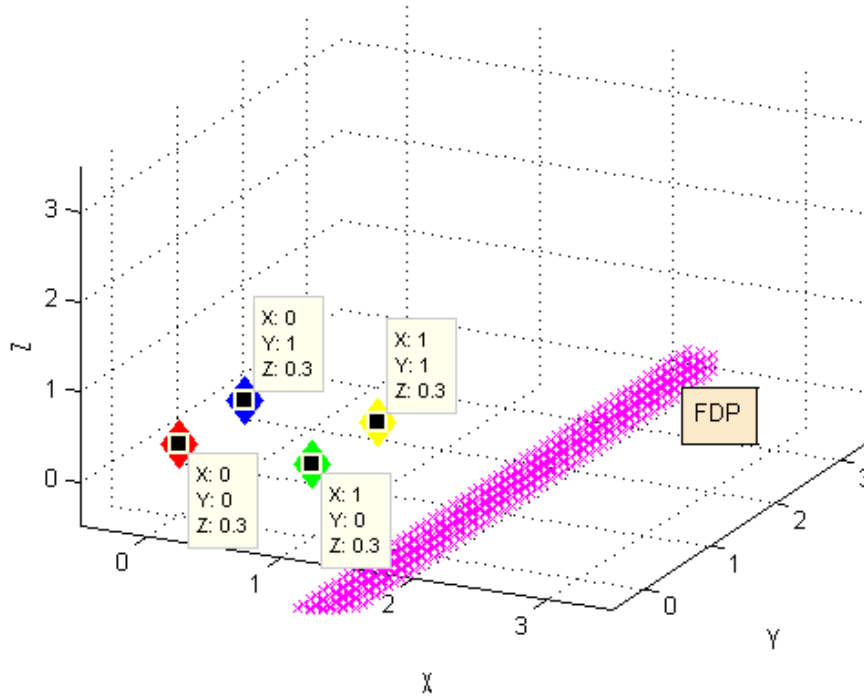


Figura 2. Desplazamiento realizado por el cubo en el código 1. Fuente propia.

Debido a sus dimensiones, el cubo está formado por un total de 27 posibles fuentes de DPs. En consecuencia, cada matriz  $dTDOA$  estará formada por 6 columnas (una por cada par de antenas) y por 27 filas (una por cada fuente). Cada matriz  $dTDOA$  se forma fila a fila hasta completarse con sus 27 filas. Una vez que está completada, se guardan en una nueva matriz  $C$  los máximos  $dTDOAs$  para cada columna, es decir, par de antenas. Para poder comprender mejor este proceso, en la tabla 2 se presenta una matriz  $dTDOA$  completada por sus 27 filas. También se muestra en la tabla 3 la primera fila de la matriz  $C$  formada por los valores más altos de cada columna de esta matriz  $dTDOA$ . Así sucesivamente, se va creando la matriz  $C$ .

$dTDOA =$					
-0.0179	-0.0449	-0.0330	-0.0270	-0.0151	0.0120
-0.0181	-0.0451	-0.0328	-0.0269	-0.0147	0.0123
-0.0179	-0.0449	-0.0330	-0.0270	-0.0151	0.0120
-0.0108	-0.0296	-0.0208	-0.0188	-0.0101	0.0087
-0.0110	-0.0297	-0.0206	-0.0187	-0.0096	0.0091
-0.0108	-0.0296	-0.0208	-0.0188	-0.0101	0.0087
-0.0032	-0.0134	-0.0082	-0.0102	-0.0050	0.0052
-0.0035	-0.0136	-0.0080	-0.0101	-0.0045	0.0056
-0.0032	-0.0134	-0.0082	-0.0102	-0.0050	0.0052
-0.0072	-0.0158	-0.0125	-0.0086	-0.0053	0.0033
-0.0074	-0.0159	-0.0123	-0.0085	-0.0049	0.0036
-0.0072	-0.0158	-0.0125	-0.0086	-0.0053	0.0033

Localización de fuentes de descargas parciales mediante optimización por enjambre de partículas

---

0.0002	0.0001	-0.0002	-0.0001	-0.0004	-0.0003
0	0	0	0	0	0
0.0002	0.0001	-0.0002	-0.0001	-0.0004	-0.0003
0.0081	0.0168	0.0125	0.0087	0.0044	-0.0043
0.0079	0.0167	0.0128	0.0088	0.0049	-0.0039
0.0081	0.0168	0.0125	0.0087	0.0044	-0.0043
0.0035	0.0128	0.0071	0.0094	0.0037	-0.0057
0.0033	0.0127	0.0073	0.0095	0.0041	-0.0054
0.0035	0.0128	0.0071	0.0094	0.0037	-0.0057
0.0112	0.0293	0.0195	0.0180	0.0083	-0.0098
0.0110	0.0292	0.0197	0.0182	0.0087	-0.0094
0.0112	0.0293	0.0195	0.0180	0.0083	-0.0098
0.0195	0.0465	0.0324	0.0270	0.0129	-0.0141
0.0192	0.0464	0.0326	0.0271	0.0134	-0.0138
0.0195	0.0465	0.0324	0.0270	0.0129	-0.0141

Tabla 2. Matriz dTDOA formada por 27 filas.

C =0.0195	0.0465	0.0330	0.0271	0.0151	0.0141
-----------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabla 3. Primera fila de la matriz C formada a partir de la matriz dTDOA.

Por tanto, la matriz C se va formando fila a fila hasta completarse con 61 filas debido a que se crean 61 matrices dTDOAs en este código.

Por último, para los seis pares de antenas se obtienen unas gráficas como la figura 3 en la que representan los valores registrados por columna en la matriz C frente al desplazamiento en la dirección y del cubo. Con estas gráficas como resultado, se puede analizar para qué posición de la fuente central resulta menos sensible el error a cometer en el cálculo de los TDOAs para cada par de antenas sin superar los límites establecidos para el error de posición.

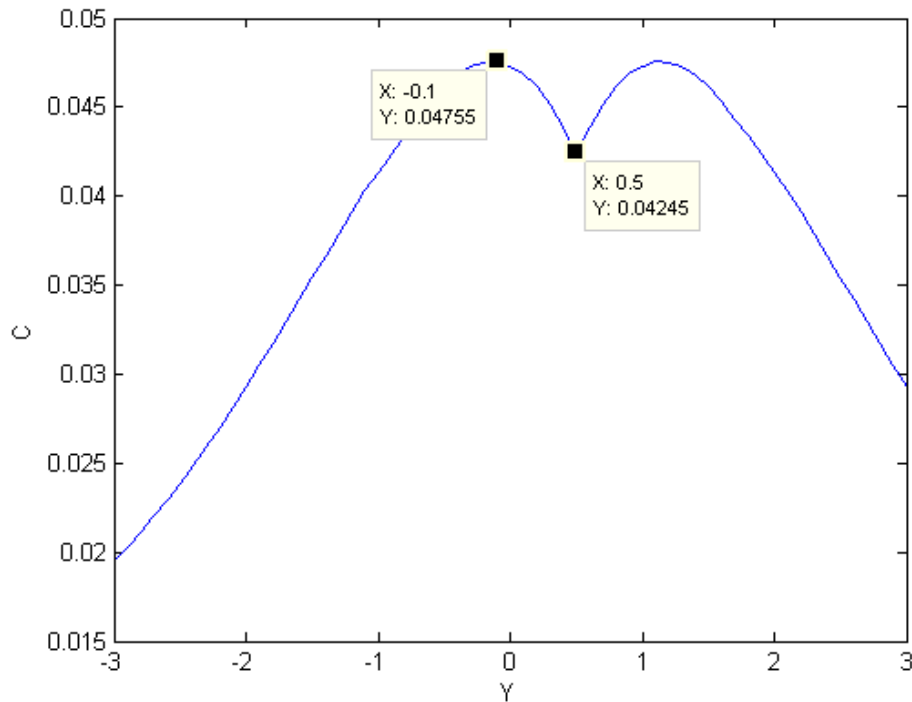


Figura 3. Valores de la matriz  $C$  para el par de antenas 1-2 acotando el error de posición con un cubo cuyas aristas miden 0,2 m. Fuente propia.

En la figura 3 se aprecian dos máximos, cuyo valor del máximo desfase de TDOA tiene un valor de 0,04755 m para ambos. También resulta importante destacar la existencia de un mínimo entre los máximos, una posición menos ventajosa para la que el máximo dTDOA a cometer decrece. Las coordenadas de este mínimo son  $x_{f_0} = 2,4$  m,  $y_{f_0} = 0,5$  m y  $z_{f_0} = 0,3$  m. De todos modos, no se trata de una posición tan peligrosa como la que se registra a ambos lados de la curva, donde a partir de los máximos los valores de  $C$  comienzan a disminuir considerablemente. Estos resultados se han obtenido para un cubo cuyas aristas medían 0,2 m.

En la figura 4 se muestra cómo aumentan los resultados obtenidos en la matriz  $C$  para un cubo de mayores dimensiones, concretamente, con una longitud de sus aristas de 0,4 m. El resultado esperado es que los máximos dTDOAs aumenten debido a que si el error de posición permitido aumenta de 0,2 m a 0,4 m, los errores a cometer en el cálculo de los TDOAs también van a crecer.



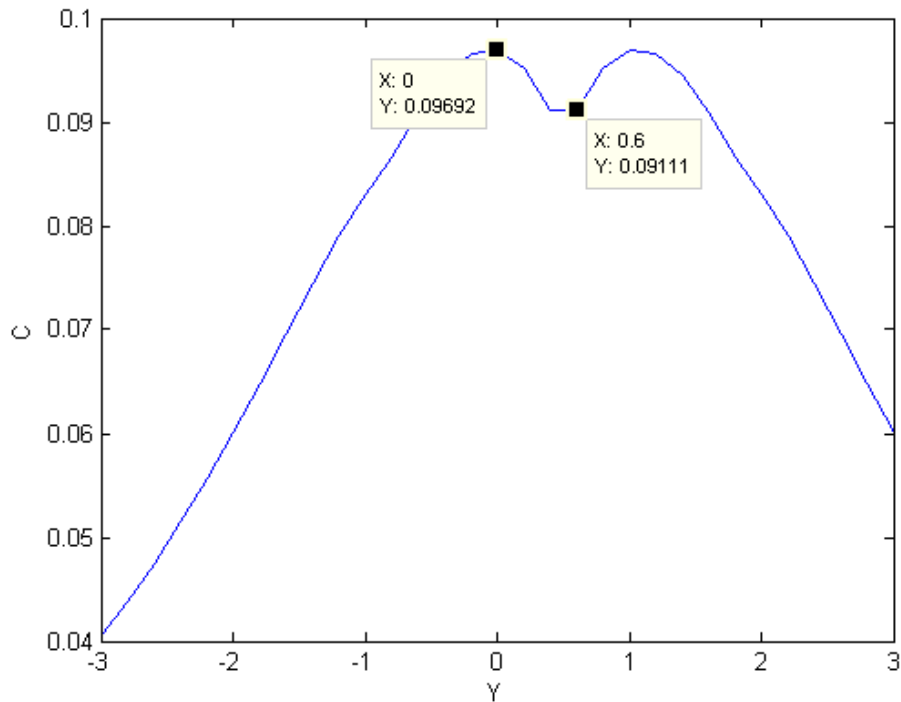


Figura 4. Valores de la matriz C para el par de antenas 1-2 acotando el error de posición con un cubo cuyas aristas miden 0,4 m. Fuente propia.

Efectivamente, en la figura 4 se observa que el máximo dTDOA de la curva tiene un valor de 0,09692 m, mucho mayor que el valor obtenido para la figura 3 en la que el error de posición estaba acotado por un cubo de 0,2 m de arista. El valor del mínimo de la curva también ha crecido respecto al caso anterior aumentando de 0,04245 m a 0,09111 m.

Este código sirve como punto de partida para el siguiente capítulo, en el cual se va a analizar qué importancia tiene para la localización, la posición que presenten las antenas respecto a la fuente de DPs.

## Capítulo 3

### Estudio de la posición de la configuración de antenas respecto a la fuente de descargas parciales

#### 3.1 Análisis del problema a resolver

Conociendo los resultados obtenidos en estudios previos realizados por el grupo de investigación DIAMAT en el laboratorio de alta tensión del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid, cabe destacar que se aprecian grandes diferencias en la localización de la fuente de DPs usando TDOAs de una calidad parecida en distintas situaciones. En unas ocasiones, se ubica la fuente en una misma zona con cierta claridad pero, sin embargo, en otras ocasiones el resultado se reduce a una nube dispersa de puntos que no permite fijar las coordenadas de la fuente. Ante esta problemática, en este capítulo se ha analizado si la localización se ve afectada por la posición que presenten las antenas respecto a la fuente.

En el valioso artículo escrito por Moore et al. se explican detalladamente todos los aspectos relacionados con la localización de fuentes de DPs. A lo largo de este artículo, se emplean dos tipos de configuraciones de antenas para medir DPs. En el artículo no se explica la razón de utilizar una disposición triangular y otra cuadrada, ambas formadas por cuatro antenas. [Moore 2005: 2268] Sin embargo, en el estudio realizado en este trabajo se ha decidido tomar como punto de partida esas dos mismas distribuciones.

Para llevar a cabo este análisis, se emplea de nuevo el código 1 desplazando el cubo por dos zonas diferentes. Es más sencillo mover la posición relativa del cubo respecto de las antenas, que desplazar las antenas y dejar fija la posición del cubo, aunque esto último sería lo que se haría en un caso real. Las zonas recorridas son tanto el interior como el exterior de la distribución de antenas. Estas situaciones simulan cuando las antenas rodean a la fuente y cuando no lo hacen, respectivamente. Con el fin de comparar los resultados de ambas zonas, se realiza una superposición del mismo código para las dos zonas.

Como resultado se muestran gráficas a lo largo de todo el capítulo en las que se distingue la superposición de dos curvas: una roja y otra azul, la primera pinta los resultados obtenidos para la matriz  $C$  cuando las antenas rodean a la fuente y la segunda, los mismos resultados pero cuando la fuente se desplaza por el exterior.

### 3.2. Distribución cuadrada de antenas

El código correspondiente a la superposición para la distribución cuadrada de antenas es el código 2. Por un lado, en la figura 5 aparece el cubo atravesando por la mitad la distribución de antenas, concretamente, en  $xf_0 = 0,5$  m. Los máximos dTDOAs para este caso, se pintarán en la curva roja.

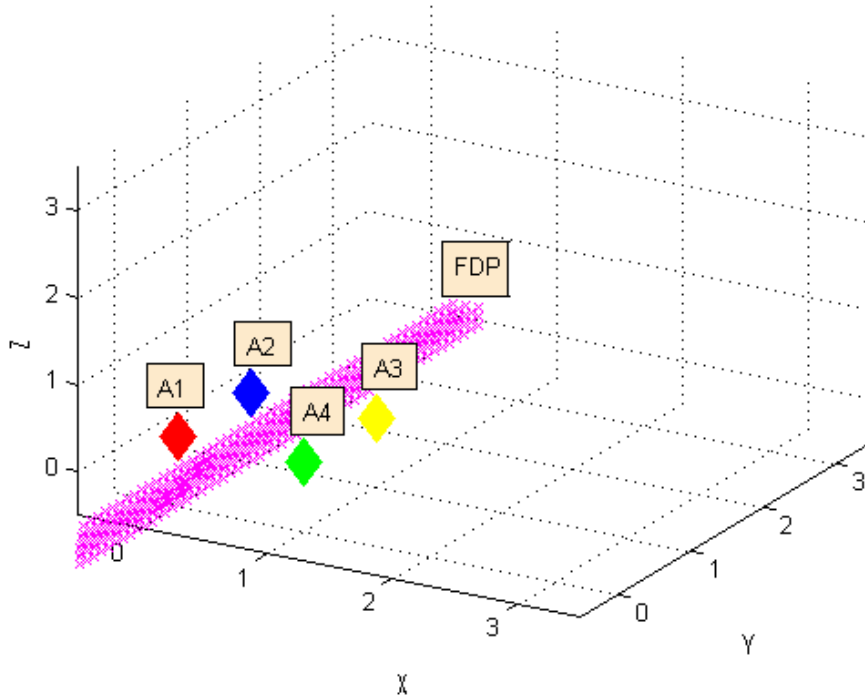


Figura 5. Fuente de DPs atravesando la distribución cuadrada. Fuente propia.

Por el contrario, en la figura 2 del capítulo anterior se muestra el conjunto de fuentes por el exterior de la distribución, concretamente, en  $xf_0 = 2,4$  m. Los máximos dTDOAs para este caso, se pintarán en la curva azul. También se indican las coordenadas de las 4 antenas para conocer las dimensiones del cuadrado que forman.

Tal y como se explicó en el capítulo anterior, en  $C$  se recogen los máximos errores que se pueden cometer en el cálculo de los TDOAs de cada par de antenas para que, en una determinada posición, se pueda acotar el error de posición de la fuente en un

cubo de arista 0,2 m. Para obtener las gráficas que se muestran a continuación, se ha utilizado la matriz C formada por tantas columnas como pares de antenas y tantas filas como posiciones recorridas. Como se analiza cada par de antenas por separado, se selecciona su columna correspondiente y se representa frente al eje Y (dirección de desplazamiento).

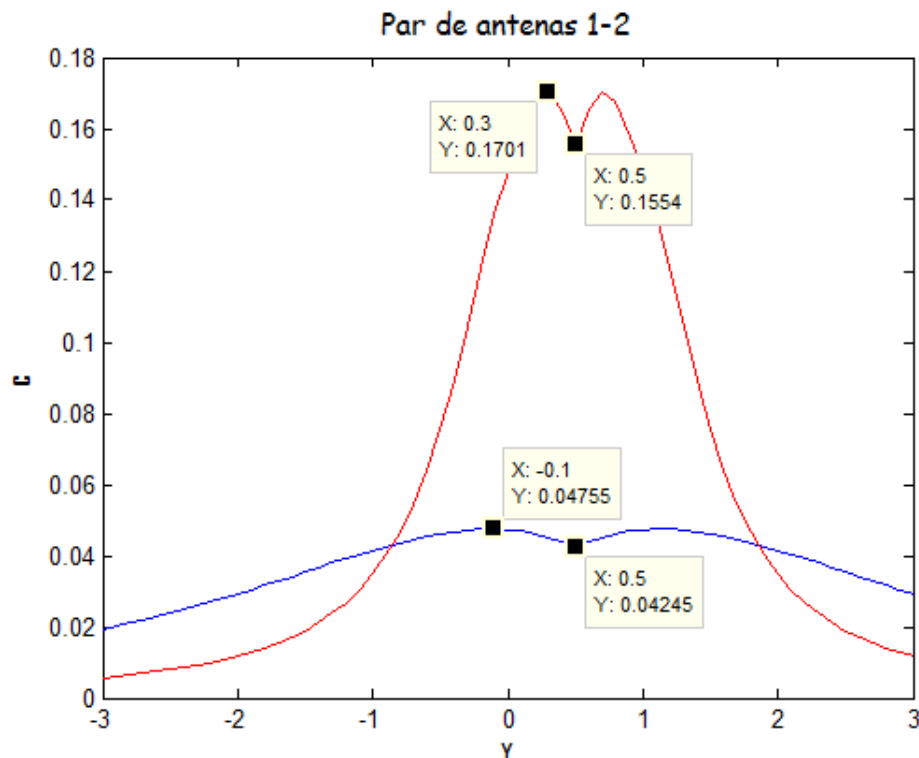


Figura 6. Superposición de curvas para el par de antenas 1-2 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

Por un lado, en la figura 6 se distingue la gran diferencia entre el máximo de la curva roja, cuyo valor es de 0,1701 m, frente al máximo de la curva azul de 0,04755 m. Esta diferencia de 0,1225 m entre los máximos de las dos situaciones, confirma que la posición de las antenas respecto a la fuente es un factor determinante en el ámbito de la localización. El hecho de que los máximos dTDOAs sean lo más elevados posible se traduce en contar con un mayor margen para realizar las medidas de los TDOAs, a pesar de la presencia de errores propios de la fase de medidas. Por otro lado, el mínimo también se ha visto incrementado más de tres veces el valor de la curva correspondiente a la zona exterior.

En general, para las gráficas se identifican y analizan tanto los máximos como los mínimos. Se busca aumentar el mínimo de cada par de antenas lo máximo posible y,

por otro lado, conocer las coordenadas del eje Y (correspondientes al eje horizontal de las gráficas) correspondientes al máximo. Los máximos representan la mejor de las posiciones en las que se podría situar la fuente debido a que se trata de la posición para la que los dTDOAs son más elevados para ese par de antenas.

Analizando la figura 6, para este par de antenas el máximo de la curva roja alcanza un valor del desplazamiento del cubo en el eje Y igual a 0,1701 m. Por lo tanto, las coordenadas de la fuente de DP para la que se podría mantener un mayor rango de error en las medidas, sin afectar a la localización de la fuente dentro del cubo, serían  $xf_0 = 0,5$  m,  $yf_0 = 0,3$  m y  $zf_0 = 0,3$  m tal y como se indica en la figura 7.

La solución que conlleva al aumento de los mínimos valores registrados en la matriz C consiste en variar la posición del conjunto de antenas, fijada anteriormente, hasta conseguir que la fuente central adquiriera las coordenadas correspondientes a los máximos obtenidos para cada par de antenas.

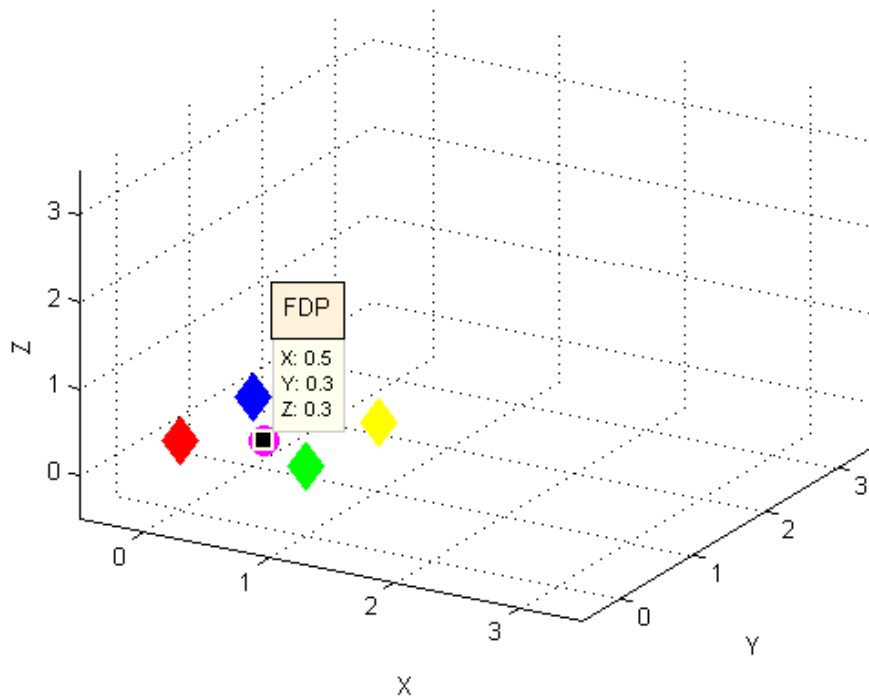


Figura 7. Posición de la fuente de DP correspondiente al máximo de la curva roja de la figura 6. Fuente propia.

Cabe destacar que para otros valores de  $yf_0$ , concretamente esto se observa en los extremos de la figura 6, la curva roja se encuentra por debajo de la curva azul. Esto implica que la trayectoria más adecuada a seguir por la fuente puede cambiar. Esta idea se muestra en la figura 8, en la cual aparecen pintadas dos trayectorias diferentes. Por un lado, se muestra una trayectoria roja situada en  $xf_0 = 0,5$  m y por otro lado, una

trayectoria azul situada en  $xf_0=2,4$  m. En general, estas dos trayectorias pretenden mostrar dos situaciones diferentes de la fuente según si está dentro o fuera de la configuración de antenas. En este ejemplo, el cual pretende mostrar lo que ocurre con la orientación de las antenas, las antenas permanecen fijas aunque en la realidad lo que permanece fijo es la fuente de DPs.

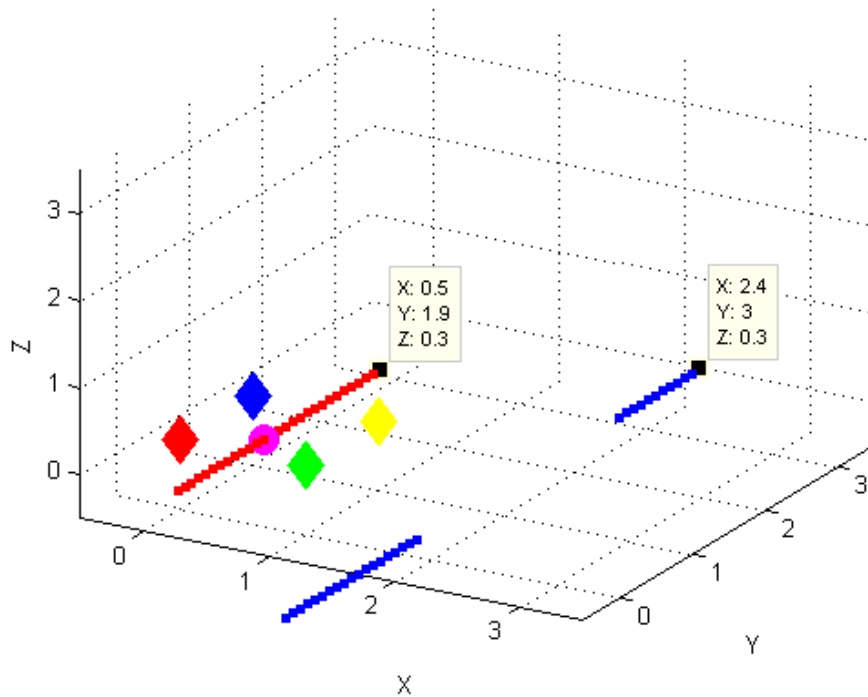


Figura 8. Posiciones de la fuente de DPs divididas por colores en función de si es mejor que se encuentre exterior o interior a la distribución de antenas. Fuente propia.

En concreto, a lo largo de la trayectoria roja el margen de error a cometer en el cálculo de los TDOAs es mayor que si para esos valores de  $yf_0$  se escogiese la trayectoria azul. Además, la mayor parte de la trayectoria roja se corresponde con la disposición en la que la fuente está rodeada por las antenas. Por otro lado, la trayectoria azul se corresponde con los desplazamientos a lo largo del eje y más alejados de la distribución. Desde  $yf_0 = -3$  m hasta  $yf_0 = -0,9$  m y desde  $yf_0 = 1,9$  m hasta  $yf_0 = 3$  m, son las zonas pintadas en azul y desde  $yf_0 = -0,9$  m hasta  $yf_0 = 1,9$  m la zona roja. Estas limitaciones se obtienen de los puntos de corte entre las dos curvas representadas en la figura 6.

Como resultado importante y con carácter general, cabe destacar que hay zonas del espacio que presentan mejores resultados aunque a primera vista parecían una trayectoria peor. Esto se muestra en la figura 8, debido a que para determinadas situaciones en las que la fuente de DPs está situada fuera de la distribución de antenas

presenta mejores resultados seguir la trayectoria azul que continuar con la trayectoria roja. En definitiva, seguir la trayectoria roja conlleva peores resultados que comenzar a seguir la trayectoria azul, una zona diferente del espacio.

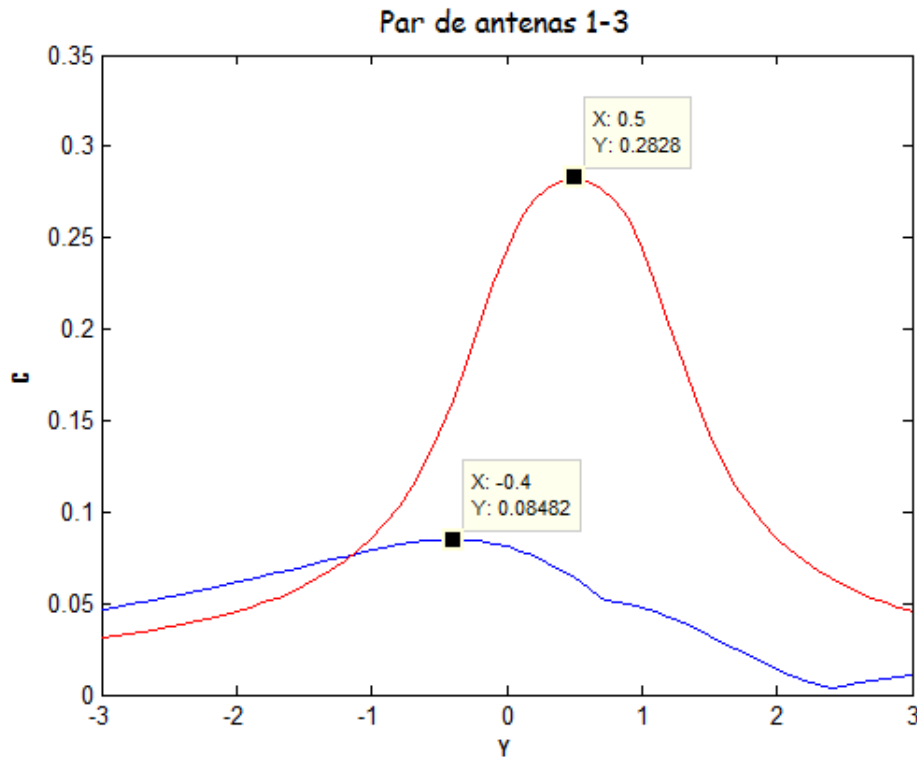


Figura 9. Superposición de curvas para el par de antenas 1-3 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

Para este segundo par de antenas, el valor de  $C$  aumenta en 0,19798 m colocando las posibles fuentes de descargas parciales atravesando a la distribución cuadrada de antenas. Las coordenadas de la fuente que se corresponden al máximo de la curva roja son  $xf_0 = 0,5$  m,  $yf_0 = 0,5$  m y  $zf_0 = 0,3$  m.

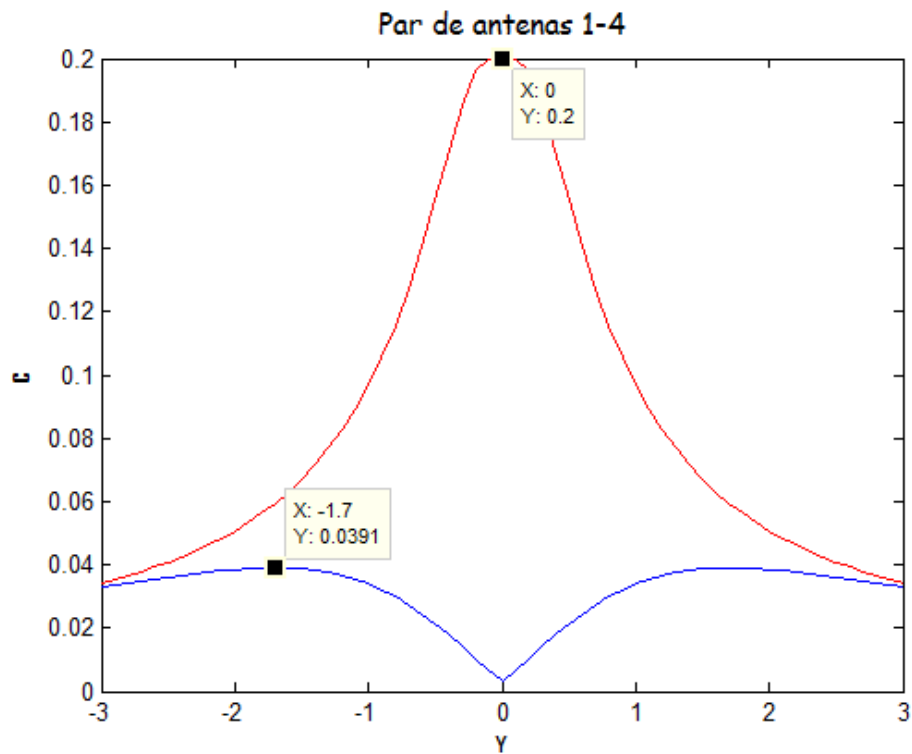


Figura 10. Superposición de curvas para el par de antenas 1-4 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

Para el par de antenas 1-4, también se ve aumentado el error factible de cometer a la hora de llevar a cabo la medición de diferencias de tiempo entre antenas en 0,1609 m. Las coordenadas de la fuente que se corresponden al máximo de la curva roja son  $x_{f_0} = 0,5$  m,  $y_{f_0} = 0$  m y  $z_{f_0} = 0,3$  m.



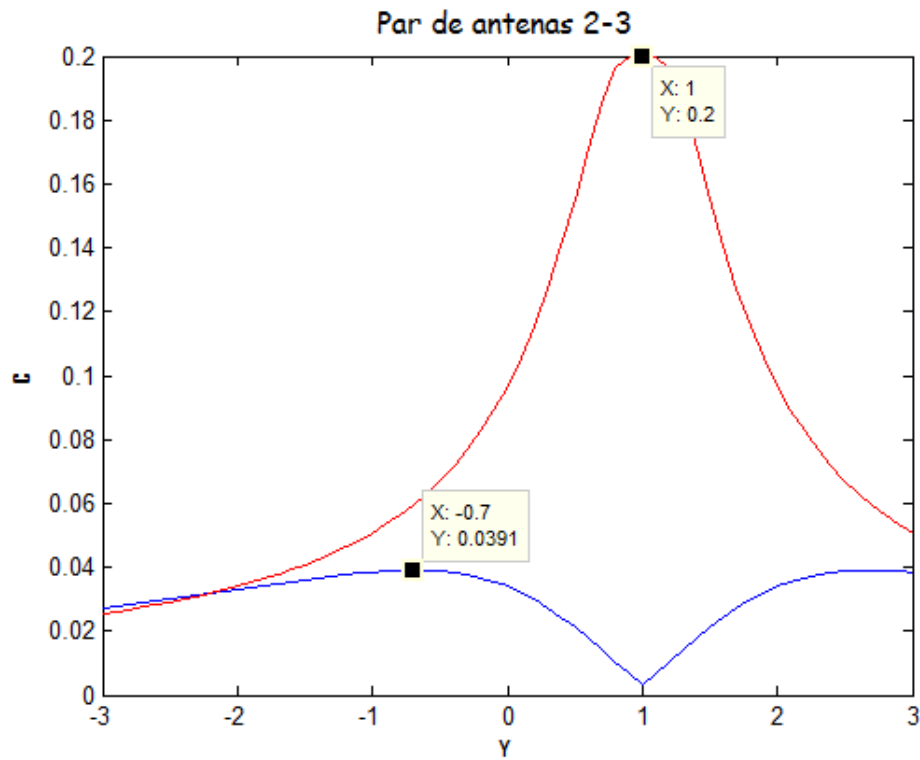


Figura 11. Superposición de curvas para el par de antenas 2-3 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

Concretamente, para los pares de antenas 1-4 y 2-3, cabe destacar que manteniendo la fuente externa al conjunto, esta distribución no es adecuada para realizar trabajos con ella. Esto se debe a que, tal y como podemos apreciar gráficamente, los máximos tienden a cero o, en su defecto, son de valor muy bajo. Las coordenadas de la fuente que se corresponden al máximo de la curva roja son  $x_{f_0} = 0,5$  m,  $y_{f_0} = 1$  m y  $z_{f_0} = 0,3$  m.

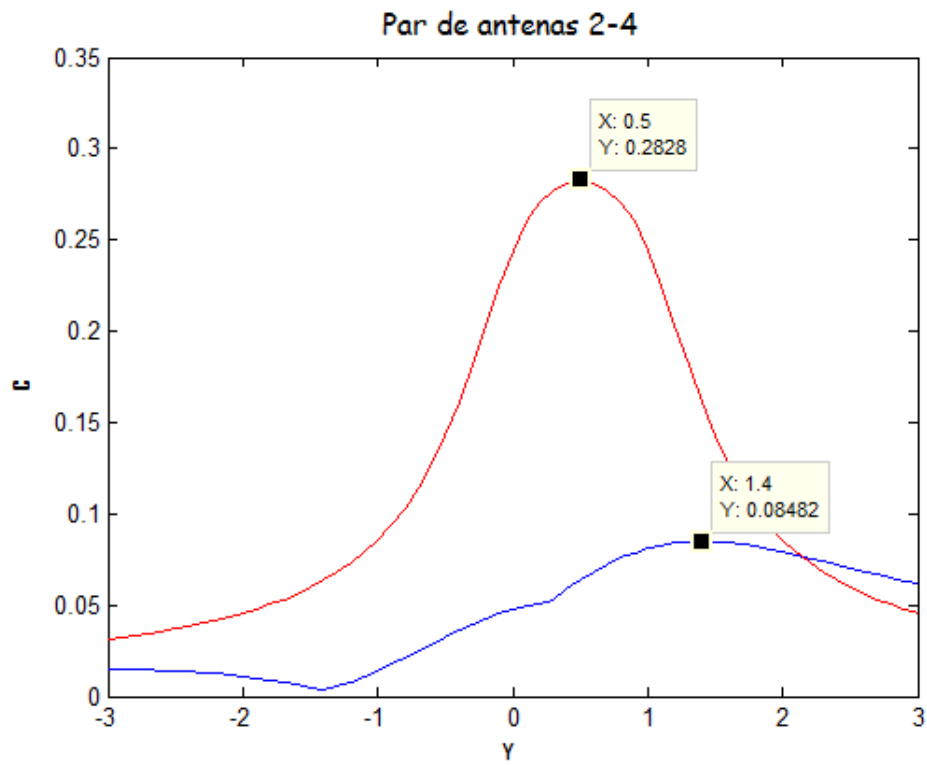


Figura 12. Superposición de curvas para el par de antenas 2-4 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

Para este par de antenas 2-4, las coordenadas de la fuente que se corresponden al máximo de la curva roja son  $xf_0 = 0,5$  m,  $yf_0 = 0,5$  m y  $zf_0 = 0,3$  m.

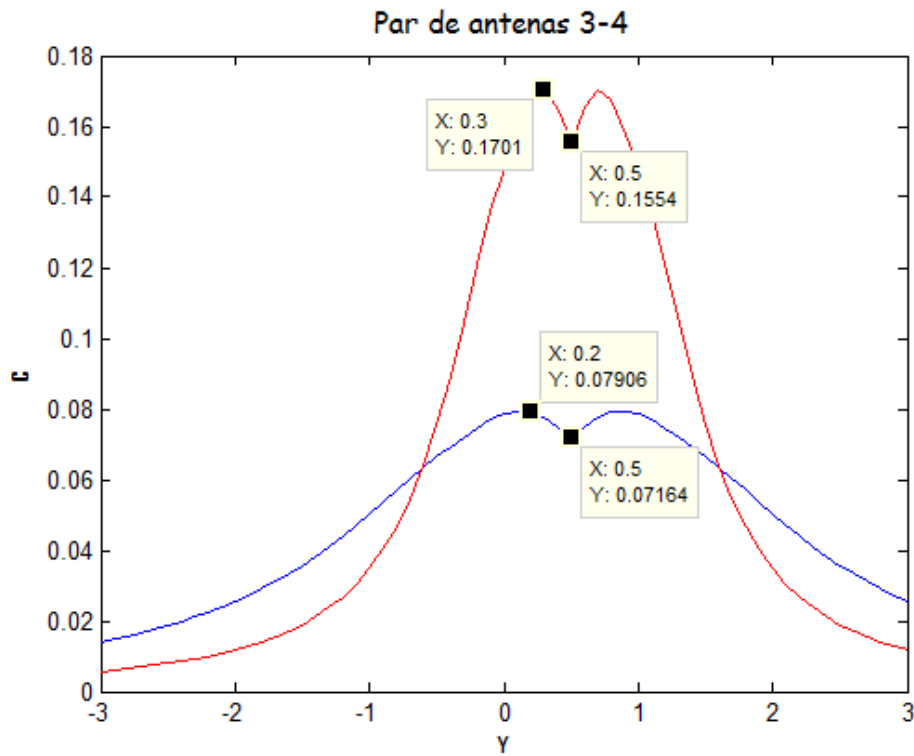


Figura 13. Superposición de curvas para el par de antenas 3-4 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

En este caso, también resulta interesante comparar no sólo los máximos valores de  $c$  de la gráfica sino también cómo se ha visto elevado el mínimo, hecho que se pretendía conseguir. El menor valor de  $c$  sólo por modificar la disposición de la fuente respecto a las antenas, se ha incrementado en 0,08376 m. Las coordenadas de la fuente que se corresponden al máximo de la curva roja son  $xf_0 = 0,5$  m,  $yf_0 = 0,3$  m y  $zf_0 = 0,3$  m.

### 3.3. Distribución triangular de antenas

Para la distribución triangular se comparan los mismos casos que para la distribución cuadrada empleando el código 3. La única diferencia se encuentra en las coordenadas por las que se desplaza el cubo debido a las diferentes geometrías que forman cada una de las configuraciones.

La figura 14 refleja la situación en la que las fuentes atraviesan al conjunto de antenas en  $xf_0 = \frac{\sqrt{3}}{4}$  m.

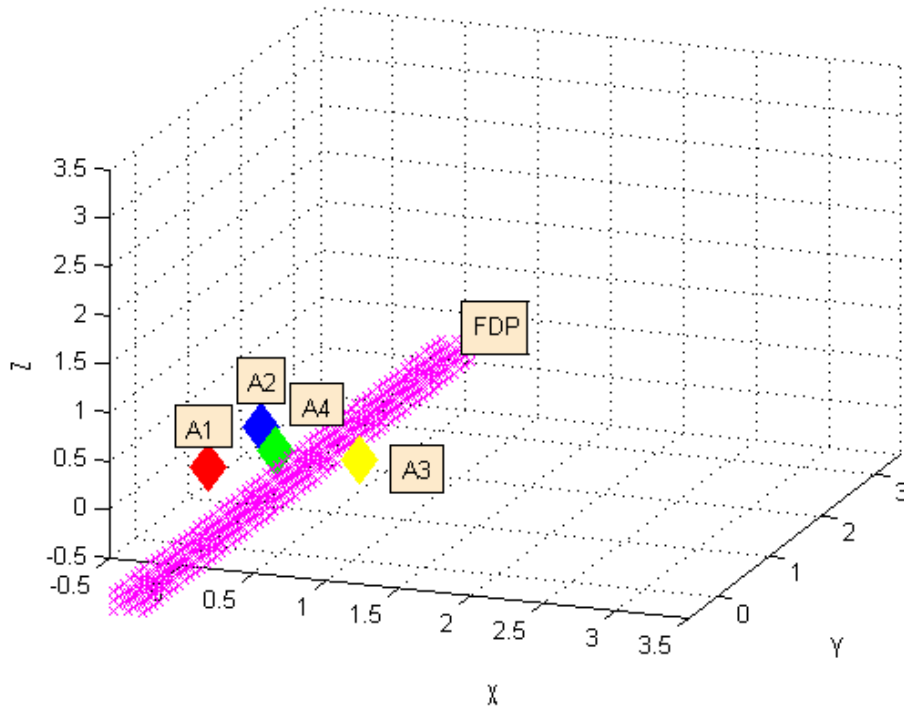


Figura 14. Fuente de DP's atravesando la distribución triangular de antenas. Fuente propia.

Por el contrario, en la figura 15 se muestra el cubo de fuentes por el exterior de la configuración para la coordenada  $xf_0 = 2,4$  m. En este caso, se ofrece la gráfica en el plano xy para poder ver con mayor claridad la posición de cada una de las antenas.

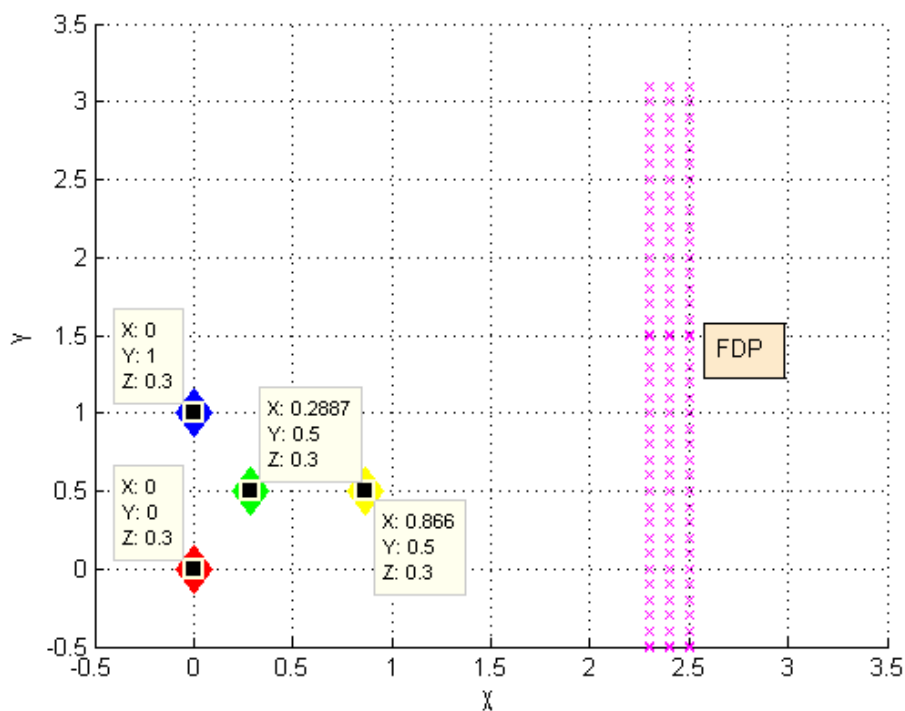


Figura 15. Fuente de DPs exterior a la distribución triangular de antenas. Fuente propia.

Las gráficas para cada par de antenas son:

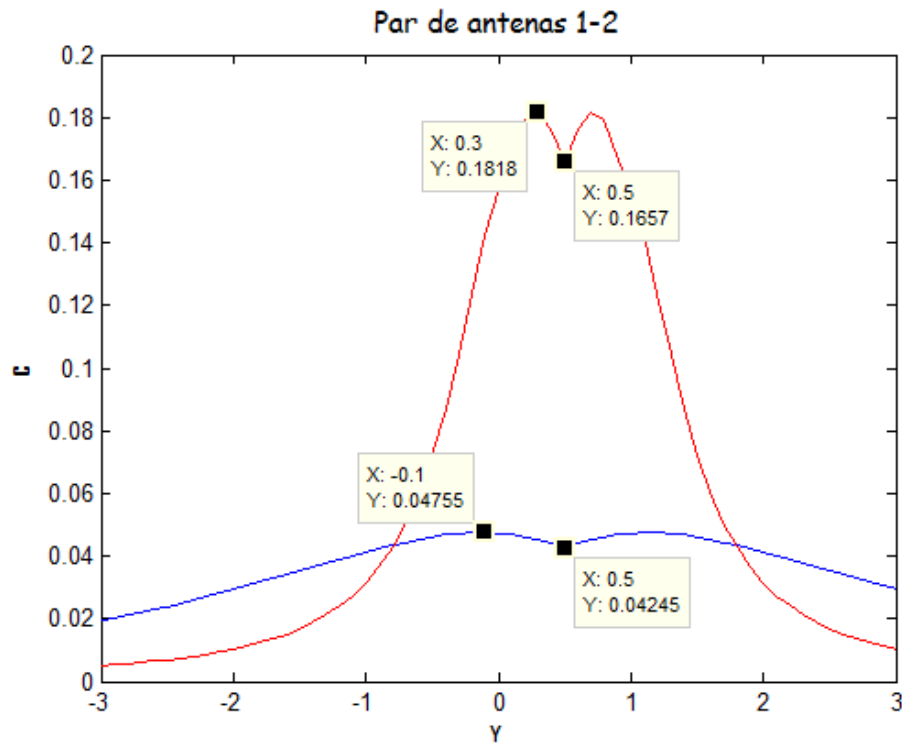


Figura 16. Superposición de curvas para el par de antenas 1-2 de la distribución triangular. Fuente propia.

Para este par de antenas correspondiente a la distribución triangular, también se aprecia en la figura 16 la diferencia entre los máximos dTDOAs de la curva roja y la curva azul. En particular, las coordenadas del máximo de la curva roja son  $xf_0 = \frac{\sqrt{3}}{4}$  m,  $yf_0 = 0,3$  m y  $zf_0 = 0,3$  m.

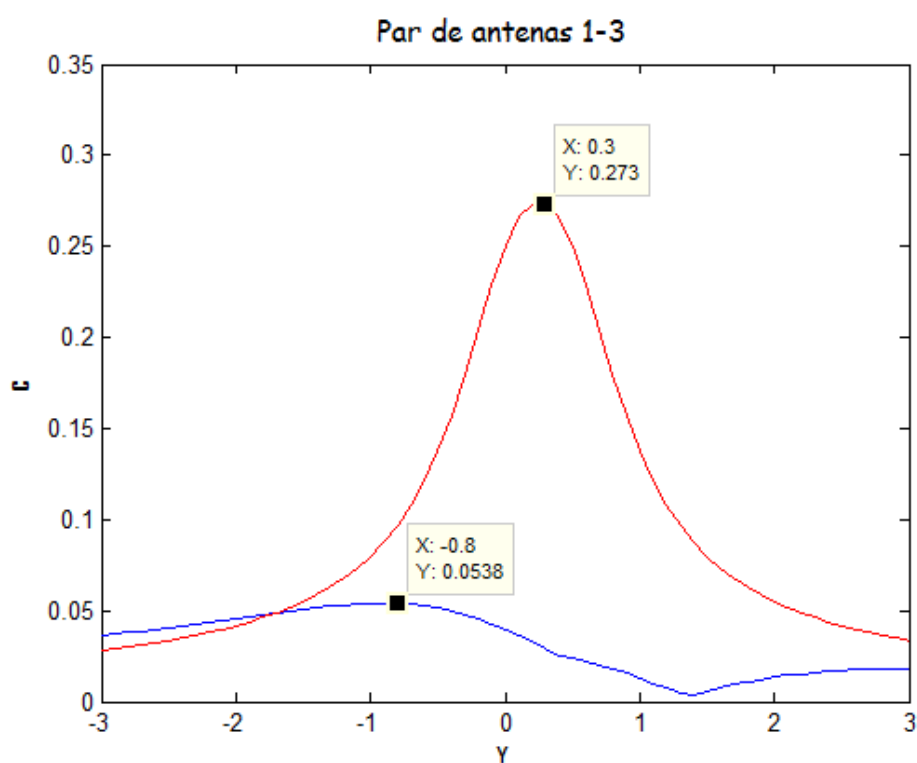


Figura 17. Superposición de curvas para el par de antenas 1-3 de la distribución triangular. Fuente propia.

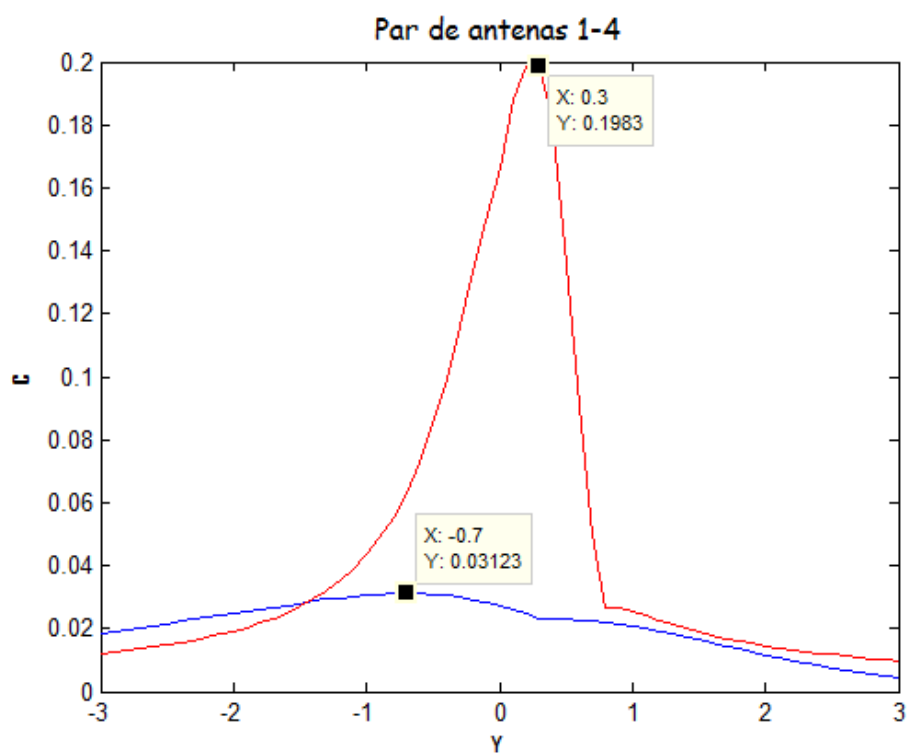


Figura 18. Superposición de curvas para el par de antenas 1-4 de la distribución triangular. Fuente propia

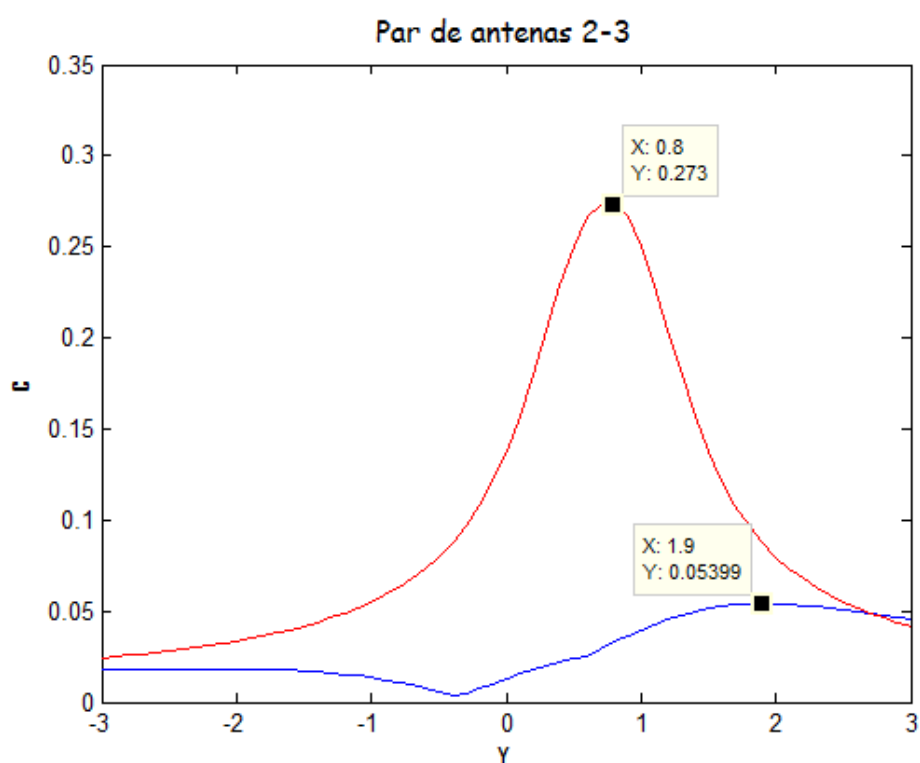


Figura 19. Superposición de curvas para el par de antenas 2-3 de la distribución triangular. Fuente propia.

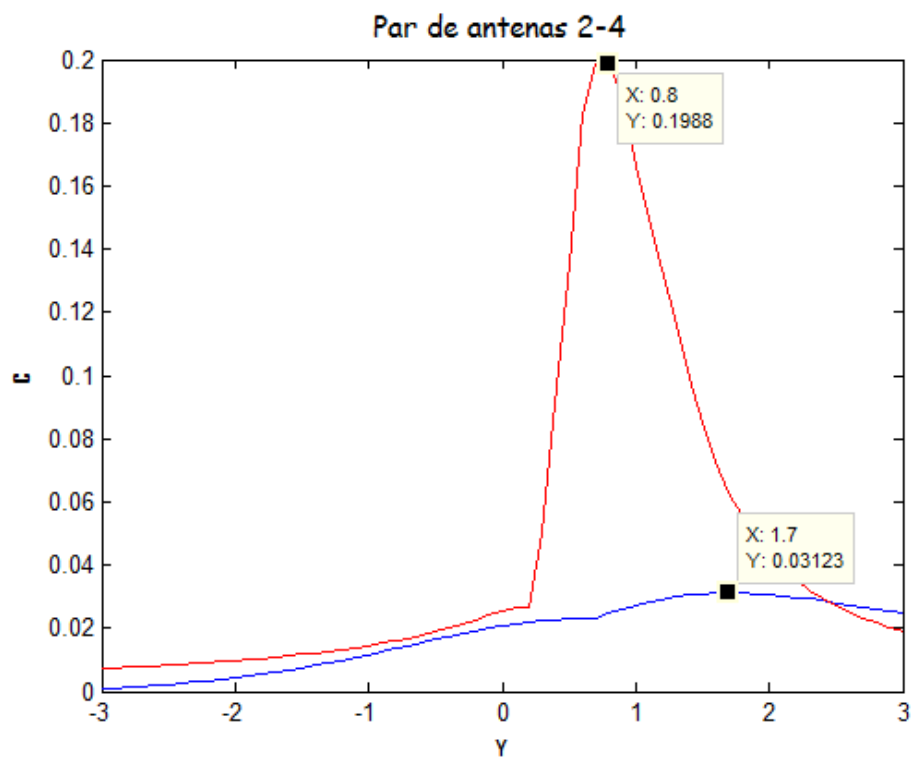


Figura 20. Superposición de curvas del par de antenas 2-4 de la distribución triangular. Fuente propia.



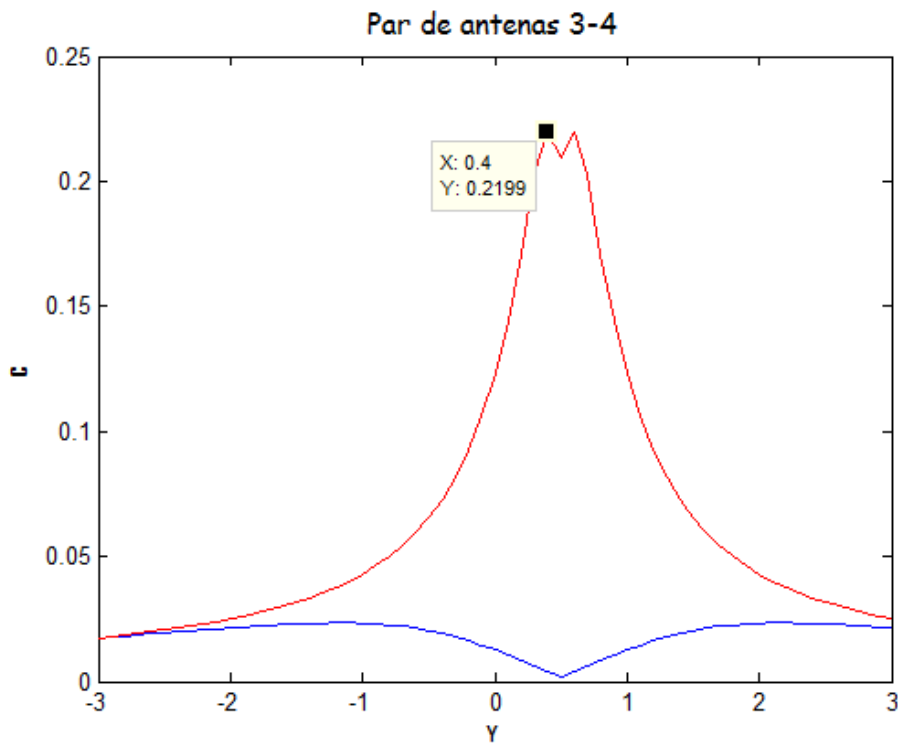


Figura 21. Superposición de curvas para el par de antenas 3-4 de la distribución triangular. Fuente propia.

Para todas estas figuras se comprueba que los resultados obtenidos en general son similares a los obtenidos para la distribución cuadrada, los máximos han aumentado considerablemente comparando la superposición de las curvas. Cabe destacar que para el par de antenas 1-2 el mínimo también se ha incrementado comparando la curva roja con la curva azul y para el par de antenas 3-4, se descarta como mejor situación que la fuente se sitúe por la zona exterior a la distribución de antenas por su tendencia del máximo a cero.

### 3.4. Análisis de los resultados

En definitiva, por un lado es necesario buscar una solución para poder elevar los mínimos valores de  $c$  de cada par de antenas. Estos puntos críticos y sensibles pueden arruinar el estudio y un aumento de su valor se traduce en una mayor holgura para poder afrontar la etapa de toma de medidas. Por otro lado, se buscan los máximos más elevados posibles para tener un margen de error de localización lo mayor posible.

Tras analizar todas las gráficas de ambas configuraciones, se confirma que la posición que presenten las antenas respecto a la fuente de DPs influye en una mejor o peor localización de la fuente de DPs. Como muestra de ello, en la figura 22 se señala

para la configuración cuadrada que justo los máximos dTDOAs se registran desde las coordenadas  $y=0$  m hasta  $y=1$  m. Esto se repite para todos los pares de antenas.

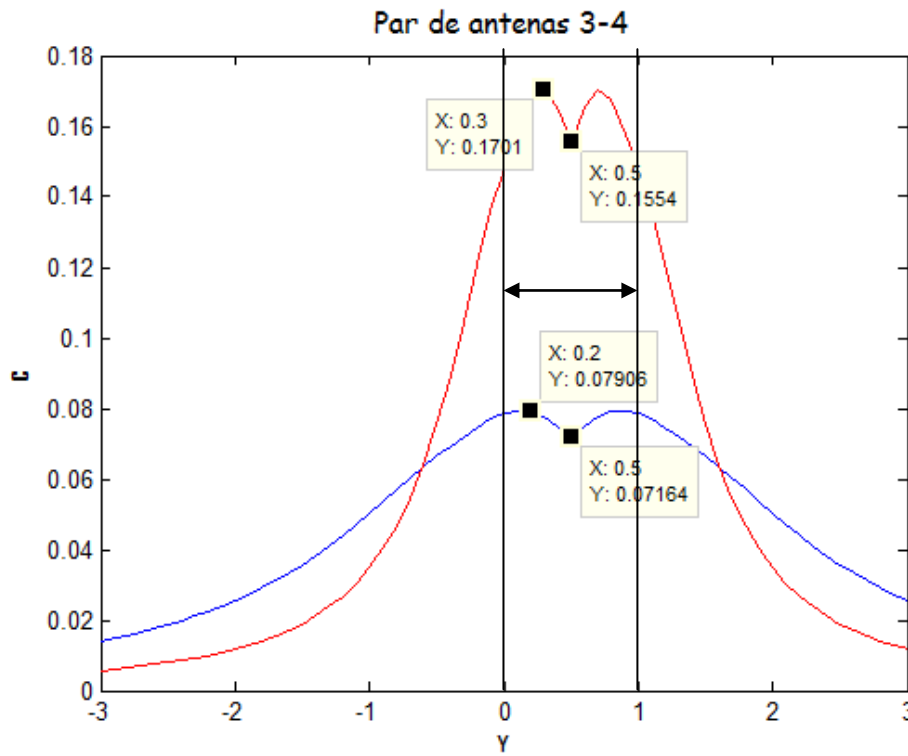


Figura 22. Máximos de C registrados desde  $y=0$  hasta  $y=1$ m. Fuente propia.

Finalmente, esto confirma que entre las dos posibilidades estudiadas, para poder localizar la fuente de DPs con una mayor exactitud lo adecuado es que las antenas se encuentren rodeando a la fuente. Para esta posición, se presentan unos requisitos que facilitan en cierto modo una mejor localización, por permitir un mayor margen de error.

Esto resuelve la problemática de la que se partía cuando se desconocían las razones por las que en algunas ocasiones no era posible localizar la fuente y, otras veces sí se lograba, trabajando con un mismo error de TDOAs. Por un lado, la nube de puntos registrada se debía a que las antenas no rodeaban a la fuente durante la adquisición del fenómeno y, por lo tanto, el error a cometer en el cálculo de los TDOAs era menor que si las antenas se encontrasen rodeando a la fuente. Esto originaba que se obtuviese como solución de la localización una nube dispersa de puntos, dificultando la identificación de la posición correcta de la fuente. Por otro lado, cuando se conseguía ubicar con claridad la fuente, la razón se debía a que la posición entre los sensores y el emisor sí era la correcta.

## Capítulo 4

### Representación en tres dimensiones de las máximas desviaciones de TDOAs.

#### 4.1. Desplazamiento a través de una superficie

Una vez establecida la mejor posición de las antenas respecto a la fuente, en este nuevo capítulo se desplaza el cubo de posibles fuentes de DPs a lo largo de la superficie interior de cada una de las configuraciones. Para ello, resulta necesario implementar un nuevo código en Matlab que permita dibujar los dTDOAs obtenidos. Por el hecho de recorrer una superficie en lugar de una dirección, las representaciones obtenidas son mucho más intuitivas. En este caso, las representaciones aportan una zona como mejor ubicación de la fuente en vez de un único punto como ocurría en el capítulo anterior.

#### 4.2. Representación de una superficie

En Matlab existen varias funciones para representar datos en tres dimensiones: `plot3`, `surf` y `mesh`, la función elegida depende únicamente de las características que se deseen que tenga la imagen obtenida. Según la elección, la gráfica puede ser mallada, completamente coloreada o con líneas. El programa implementado para obtener la representación en una superficie de los resultados registrados para las desviaciones máximas de los desfases de tiempos se recoge como código 4 en el anexo 1.

En el código 4, se necesitan dos bucles `for` para desplazar el cubo de fuentes a lo largo de una superficie. Cada posición de  $yf_0$  tiene que desplazarse por todas las posiciones indicadas de  $xf_0$ . Mediante un contador identificado como `kkk`, se contabiliza el número de intervalos definidos en incrementos de 0,1 m en 0,1 m en el recorrido que presenta  $yf_0$  desde 0 m hasta 1 m. Concretamente, `kkk` alcanza un valor de 11 intervalos lo que supone el cálculo de 11 matrices `C`. A su vez, todas estas matrices se encuentran formadas por 11 filas por el hecho de recorrer las mismas posiciones en  $xf_0$ .

De nuevo, se desean obtener como resultado gráficas para cada uno de los seis pares de antenas, necesitando recopilar los datos almacenados previamente en las matrices C. Estas nuevas matrices creadas se denominan para cada uno de los pares de antenas: `datos12`, `datos13`, `datos14`, `datos23`, `datos24` y `datos34`. Estas matrices están formadas por 11 filas y por 11 columnas. Las filas se deben a las posiciones recorridas por  $xf_0$  y las columnas a la creación de 11 matrices C. Para conseguir dos de las tres coordenadas necesarias, se usa el comando `meshgrid` con el que se crean automáticamente dos matrices de datos (X, Y). Para crear estas matrices, se necesita definir un rango de valores en el que se desea que se establezcan los puntos a dibujar como:  $x=0:0,1:1$  m e  $y=0:0,1:1$  m. La coordenada z se corresponde con las desviaciones de TDOAs almacenadas en las matrices: `datos12`, `datos13`, `datos14`, `datos23`, `datos24` y `datos34`. Como último paso, el comando `surf` es el encargado de representar la superficie empleando los datos obtenidos para los tres ejes.

#### 4.3. Resultados para la distribución cuadrada de antenas

En la figura 23 se muestra el movimiento llevado a cabo por el cubo de fuentes de DPs a lo largo de la superficie establecida por la configuración cuadrada de antenas.

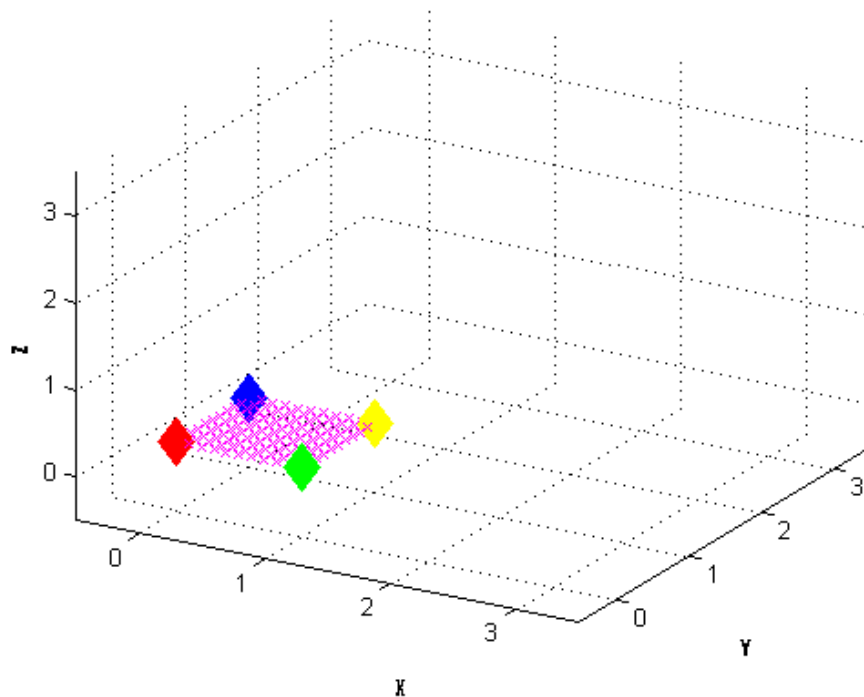


Figura 23. Superficie recorrida por la fuente en el interior de la distribución cuadrada de antenas. Fuente propia.

A continuación, se presentan las seis figuras correspondientes a cada par de antenas de esta configuración. Tal y como se puede observar, la superficie pintada está mallada y dividida en varios colores. El color rojo se encuentra en las zonas que presentan los valores más elevados frente al azul oscuro que representa los mínimos valores, ambos están seguidos de una gama de colores intermedios.

Partiendo de las gráficas de superficie de cada uno de los pares de antenas para cada distribución, si se realizasen cortes de estas superficies con planos verticales se obtendrían las gráficas del capítulo 3.

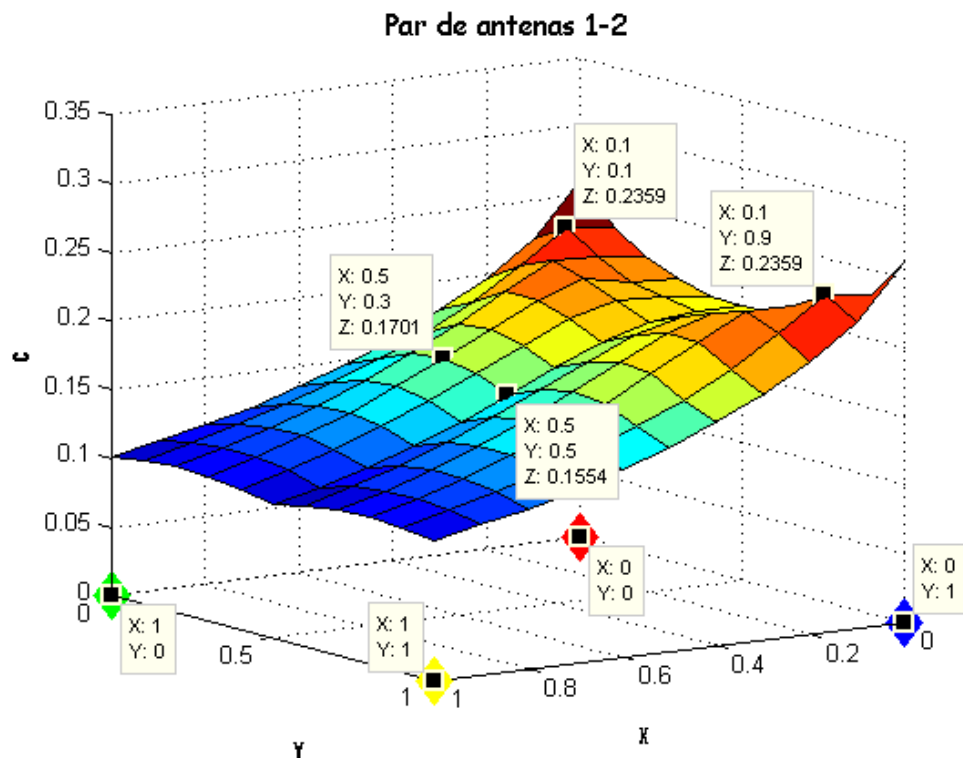


Figura 24. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 1-2 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

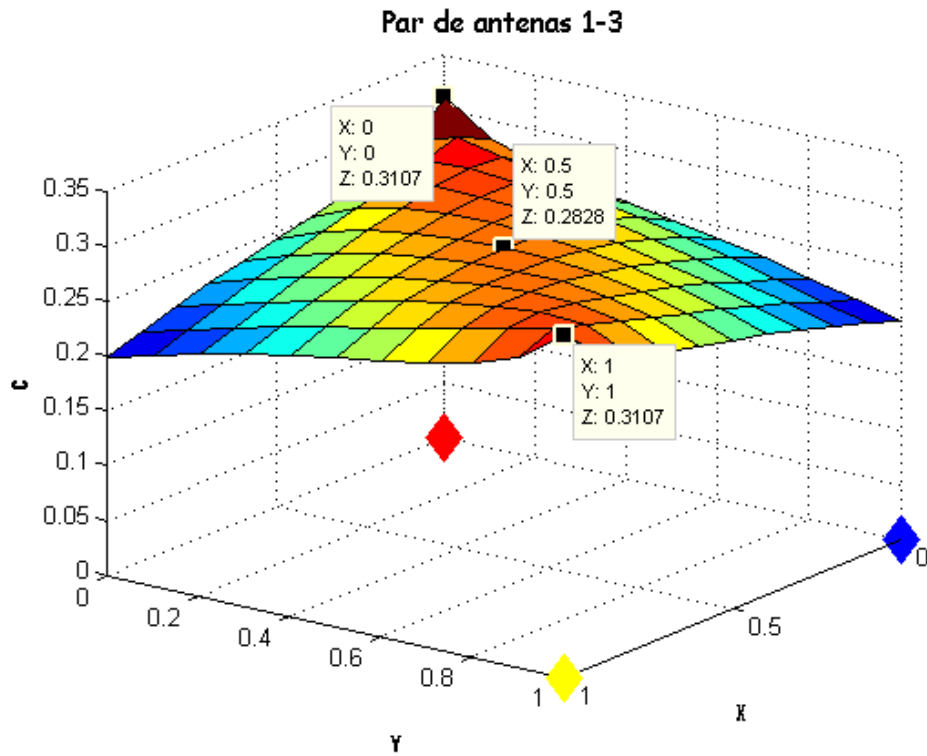


Figura 25. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 1-3 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

El par de antenas 1-3 se corresponde con las antenas roja y amarilla, las cuales forman una de las dos diagonales del cuadrado. En la figura 25 se aprecia que los mayores valores de los dTDOAs coinciden con la misma diagonal.

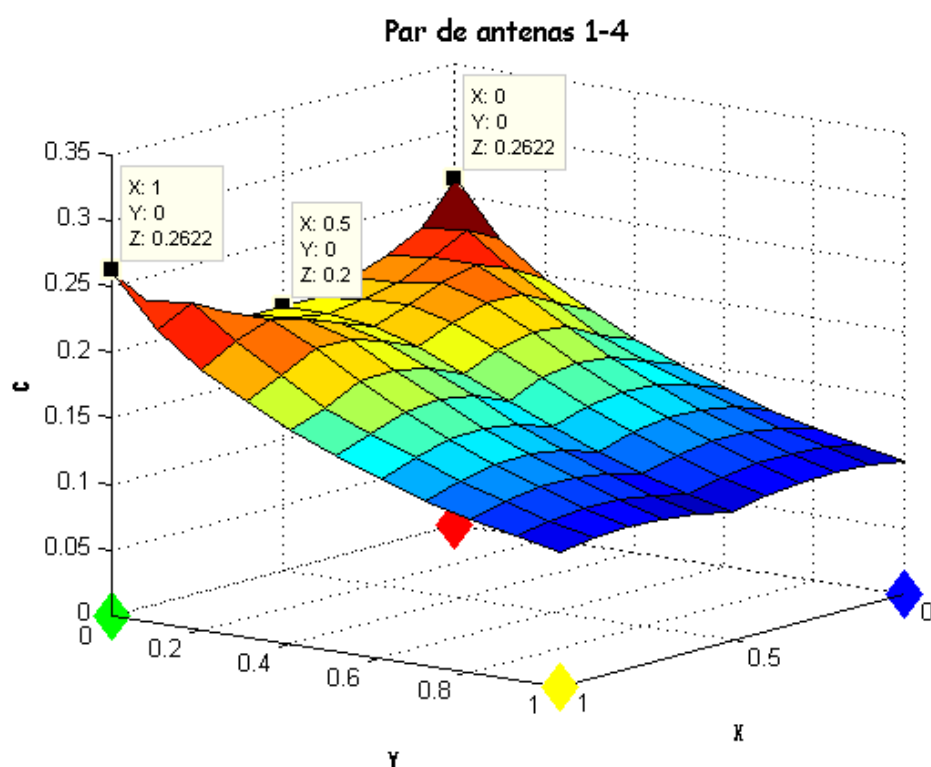


Figura 26. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 1-4 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

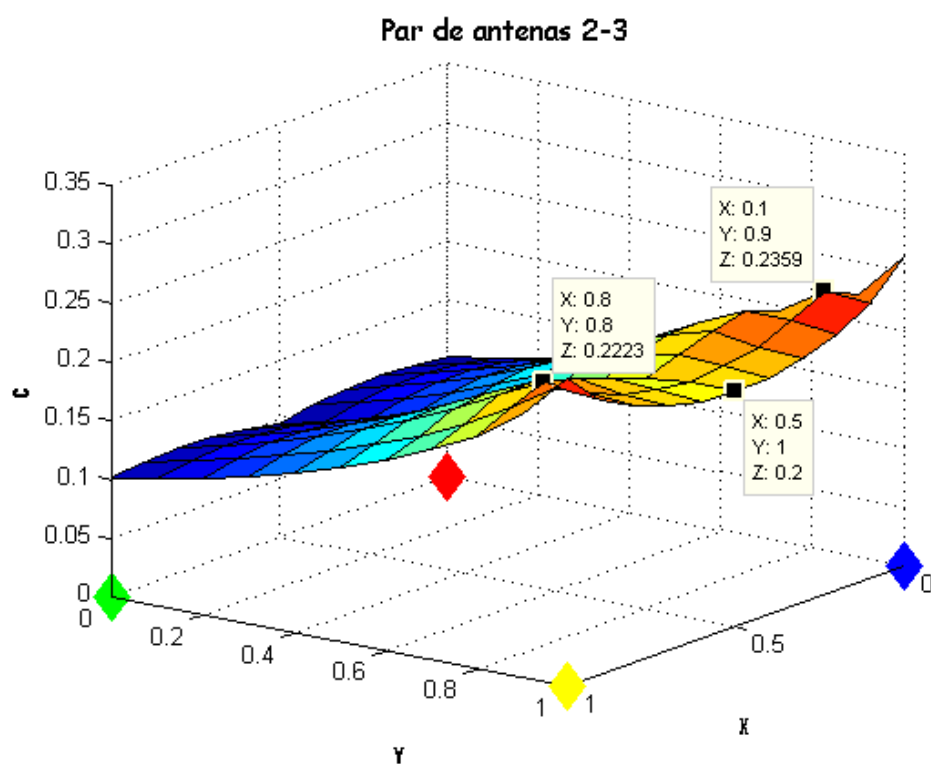


Figura 27. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 2-3 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

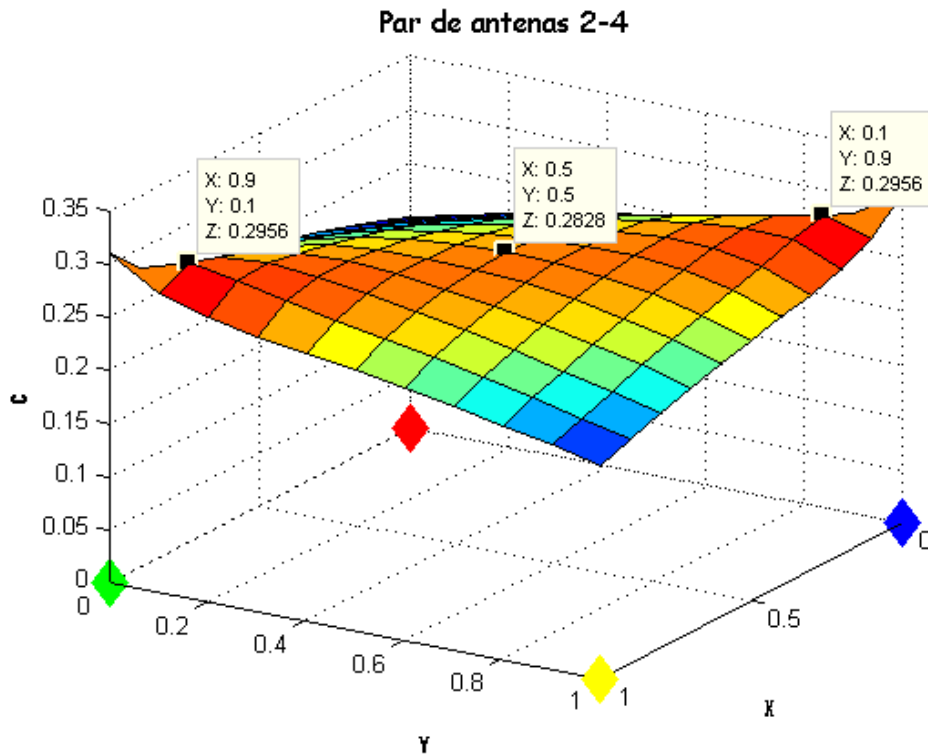


Figura 28. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 2-4 de la distribución cuadrada.  
Fuente propia.

Para la segunda diagonal del cuadrado, formada por la antena 4 (verde) y la antena 2 (azul), vuelve a coincidir la zona de los máximos dTDOAs con la diagonal.



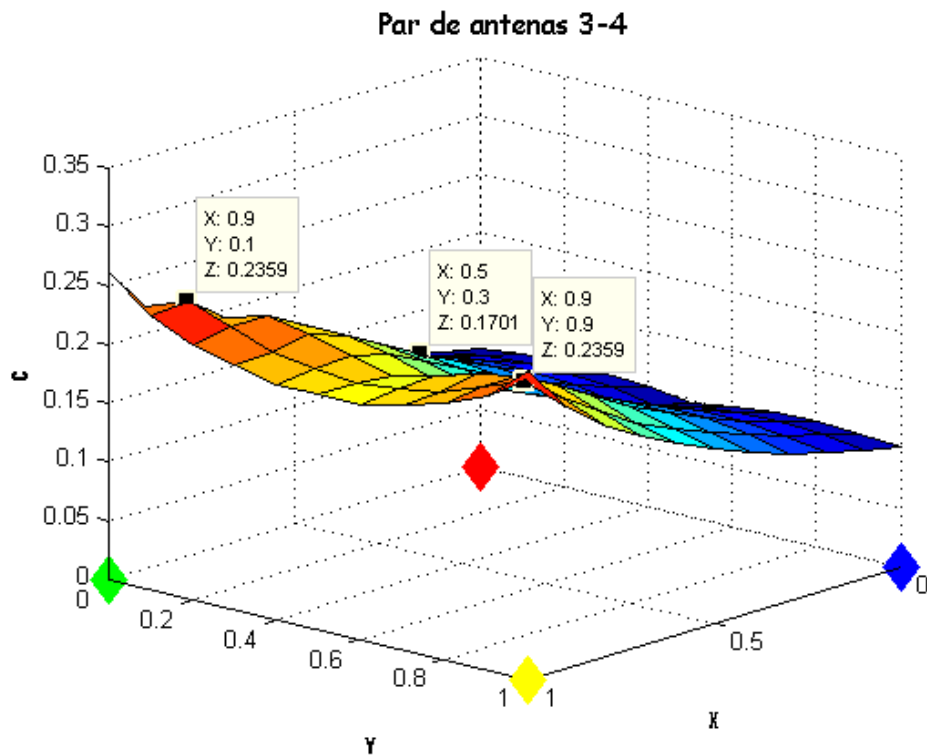


Figura 29. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 3-4 de la distribución cuadrada. Fuente propia.

A parte de obtener las gráficas de cada par de antenas por separado, se pueden representar todas en conjunto en la misma gráfica como un modo de analizar los resultados en general. Para obtener los resultados del conjunto, se calcula una nueva matriz denominada `datostotal` formada por la suma de todos los datos de los máximos desfases de TDOAs, es decir, de `datos12`, `datos13`, `datos14`, `datos23`, `datos24` y `datos34`. El resultado de la representación de la matriz `datostotal` se observa en la figura 30.

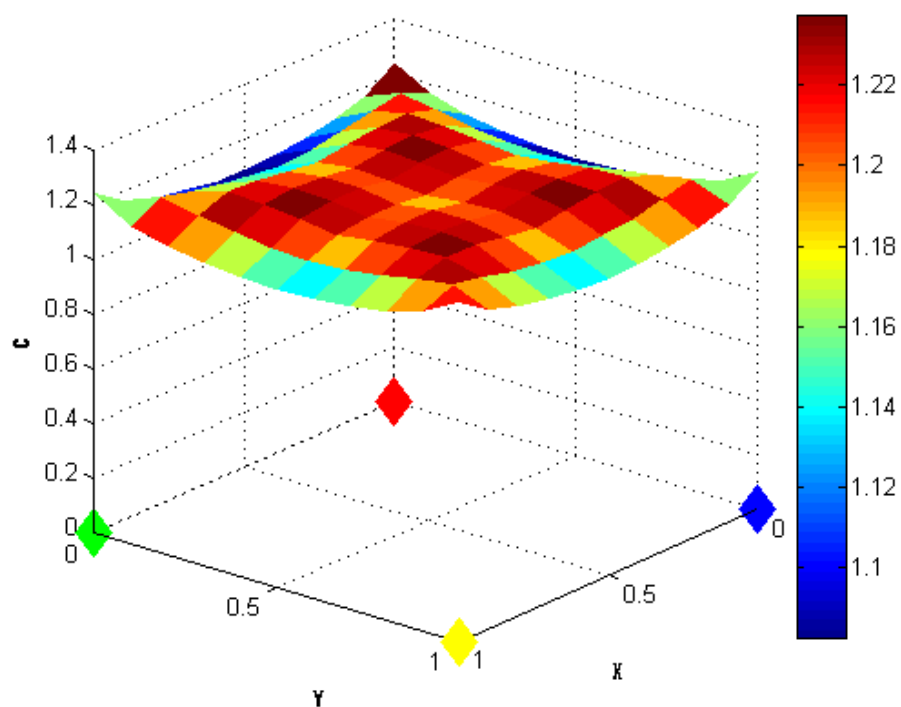


Figura 30. Representación en superficie de  $C$  para el conjunto de los pares de antenas de la distribución cuadrada. Fuente propia.

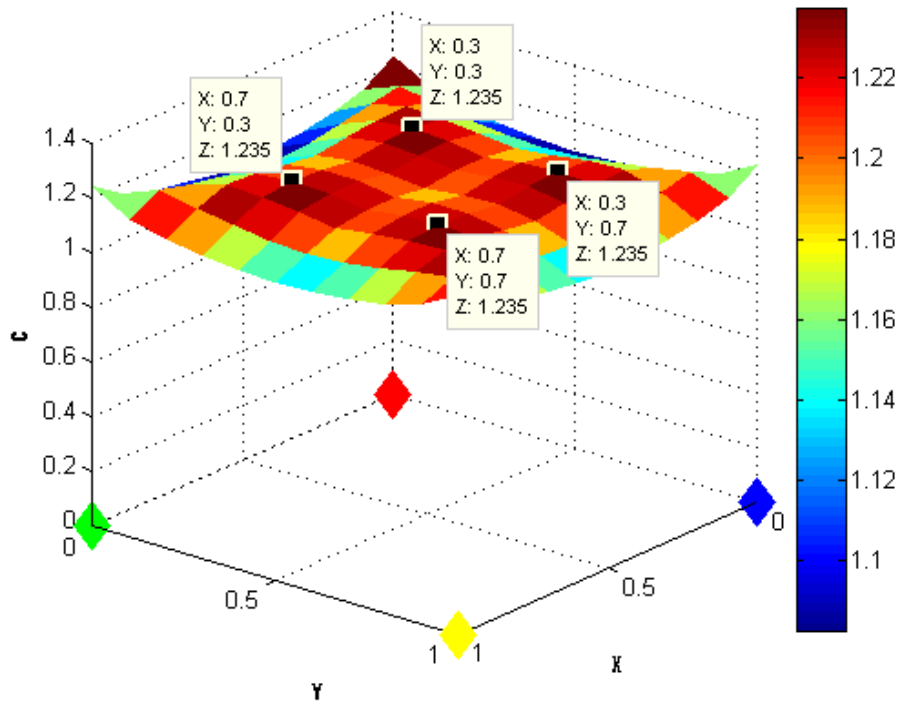


Figura 31. Máximos valores de C en la representación en superficie para el conjunto de los pares de antenas de la distribución cuadrada. Fuente propia

Los máximos de la superficie son las posiciones relativas de la fuente respecto de las antenas en las que hay menos sensibilidad al error de cálculo de los TDOAs. Concretamente, en la leyenda de colores se comprueba que el color rojo más oscuro se corresponde con los máximos valores de dTDOAs, color concentrado en una zona próxima a la zona central de la configuración cuadrada. Las coordenadas de puntos pertenecientes a esta zona son (0,7, 0,3), (0,7, 0,7), (0,3, 0,7) y (0,3, 0,3) m. Estas cuatro zonas con los valores más elevados presentan simetría al igual que las cuatro antenas y como curiosidad, cabe destacar que el máximo no se encuentra en el centro de la configuración cuadrada.

Tras analizar las figuras 30 y 31, se vuelve a confirmar la idea de que la posición de las antenas se debe fijar de tal modo que rodeen a la fuente con el fin de mejorar la localización de la misma. De este modo, para la configuración cuadrada se sigue sosteniendo la conclusión alcanzada en el capítulo anterior.

#### 4.4. Resultados para la distribución triangular de antenas

En este apartado se presentan las mismas gráficas que en el anterior pero, esta vez, para la distribución triangular de antenas. En la figura 32 se indica que el cubo de

posibles fuentes de DPs se desplaza a lo largo de la misma superficie que en el apartado anterior.

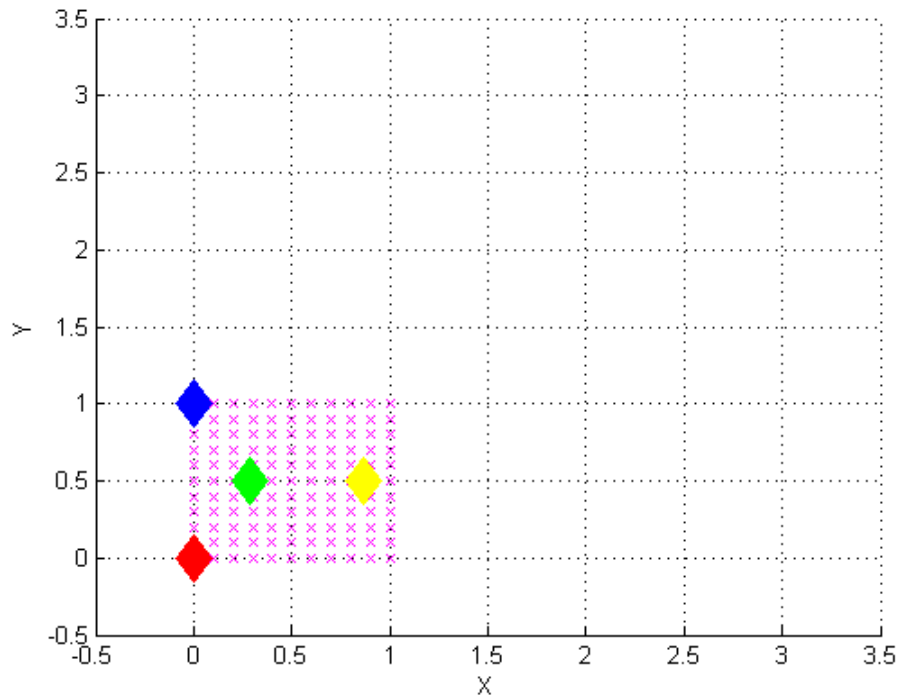


Figura 32. Superficie recorrida por la fuente en la distribución triangular de antenas. Fuente propia.

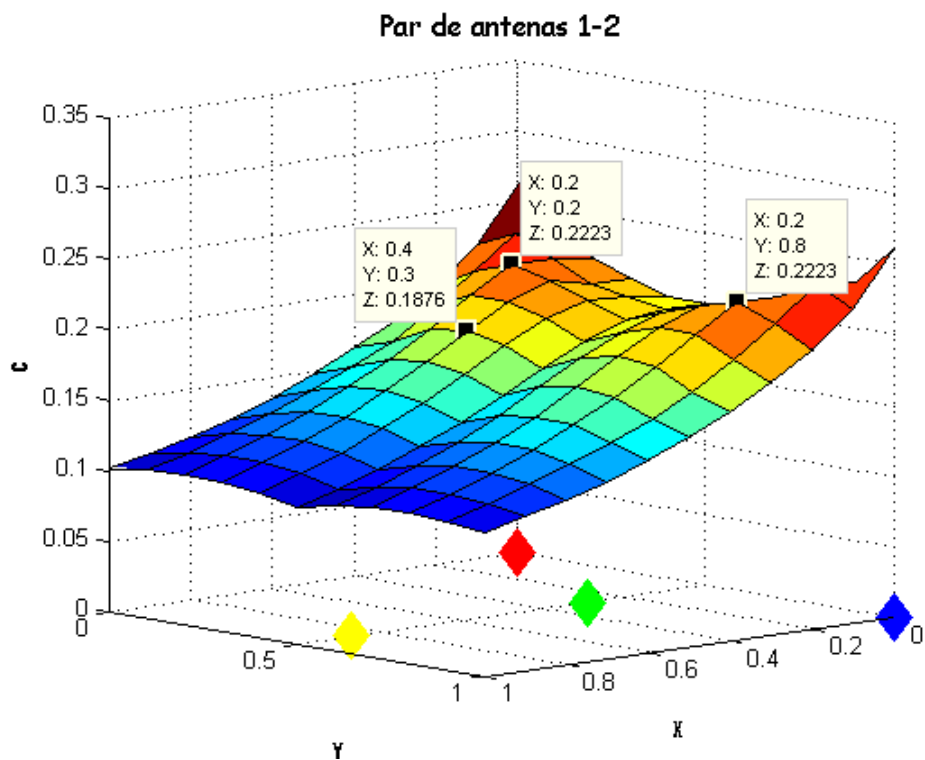


Figura 33. Representación en superficie de C para el par de antenas 1-2 de la distribución triangular. Fuente propia.

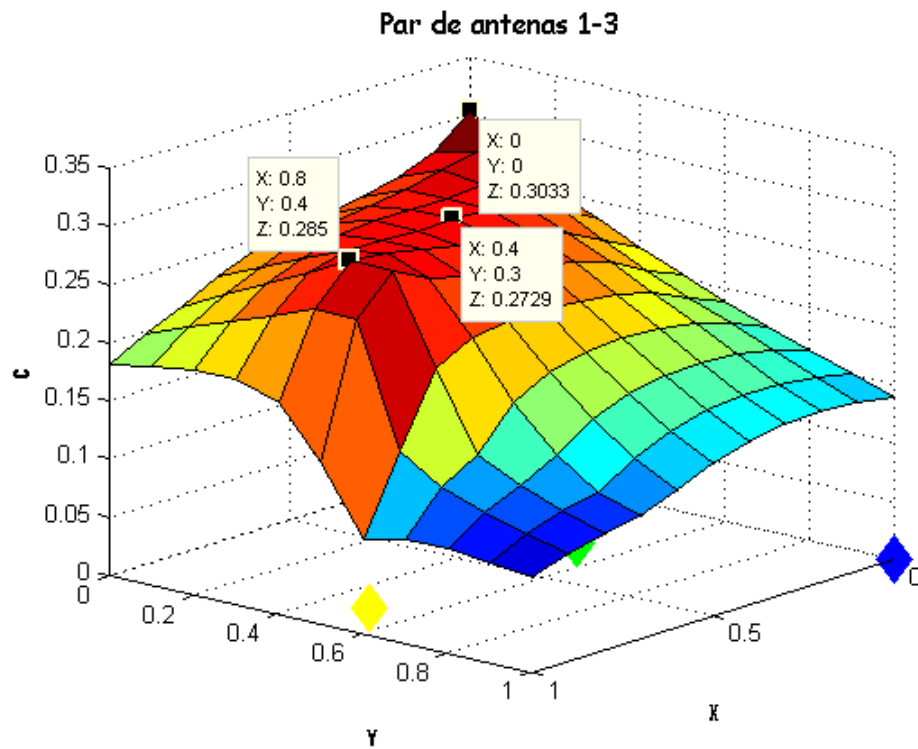


Figura 34. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 1-3 de la distribución triangular. Fuente propia.

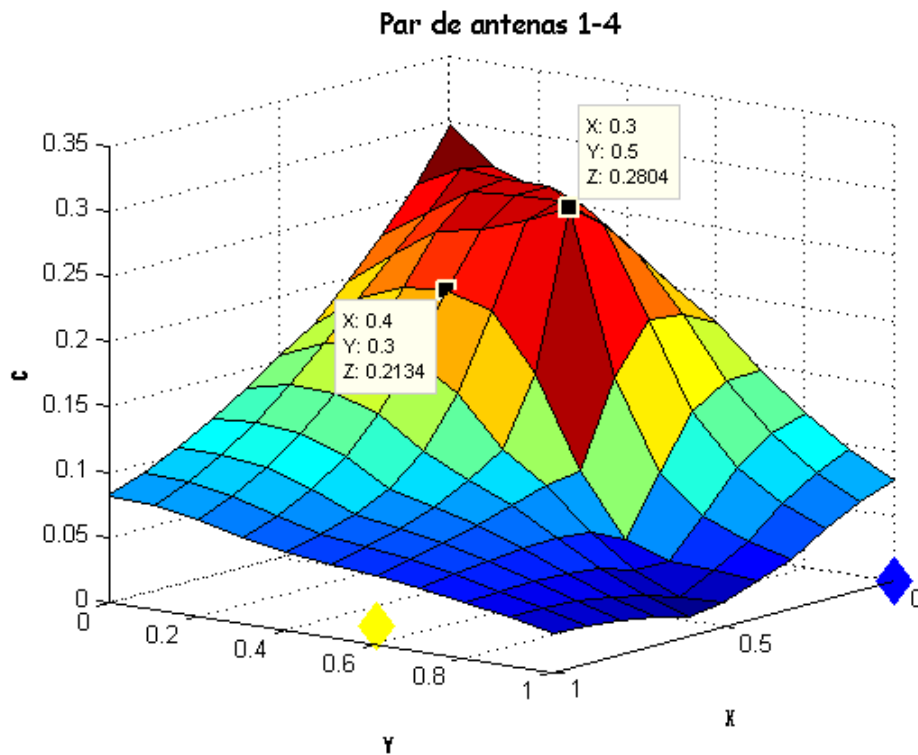


Figura 35. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 1-4 de la distribución triangular. Fuente propia.

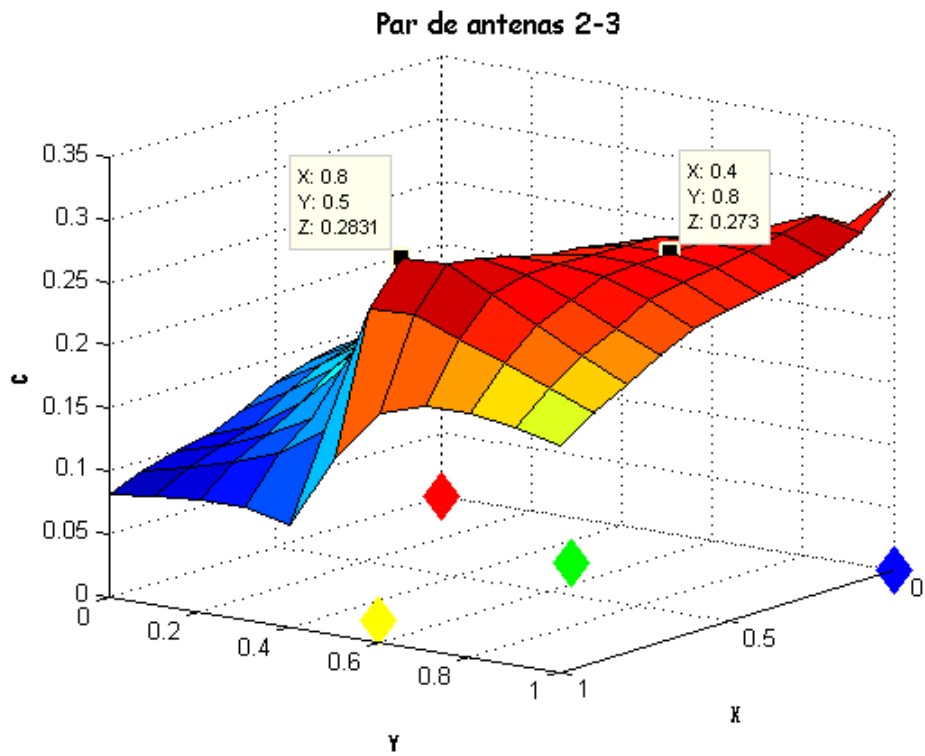


Figura 36. Representación en superficie de C para el par de antenas 2-3 de la distribución triangular. Fuente propia.

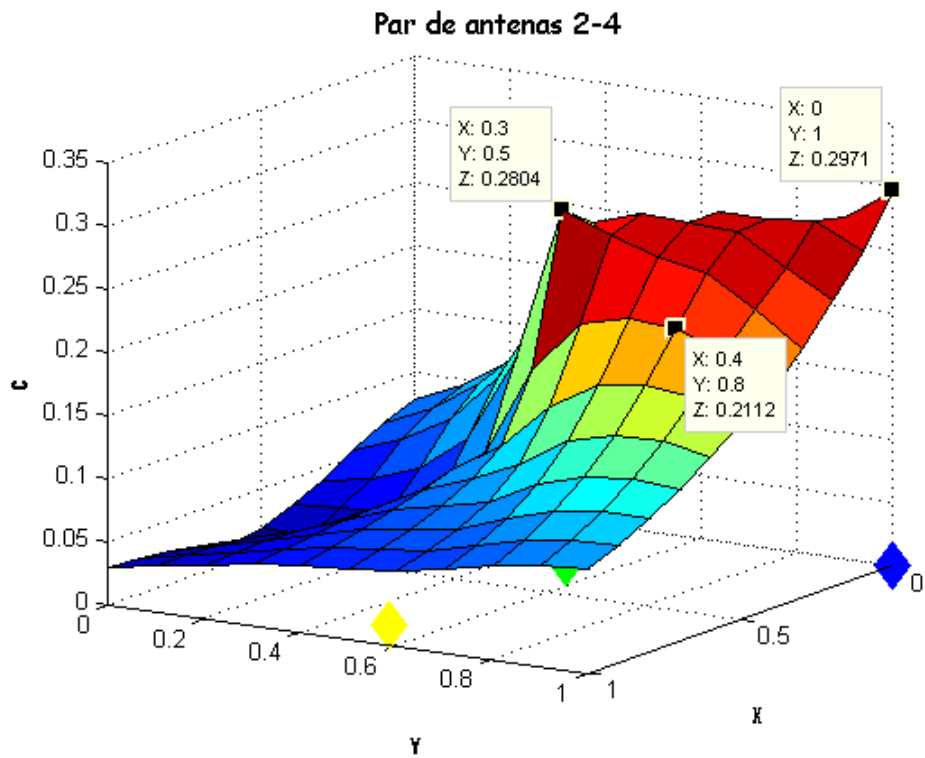


Figura 37. Representación en superficie de C para el par de antenas 2-4 de la distribución triangular. Fuente propia.

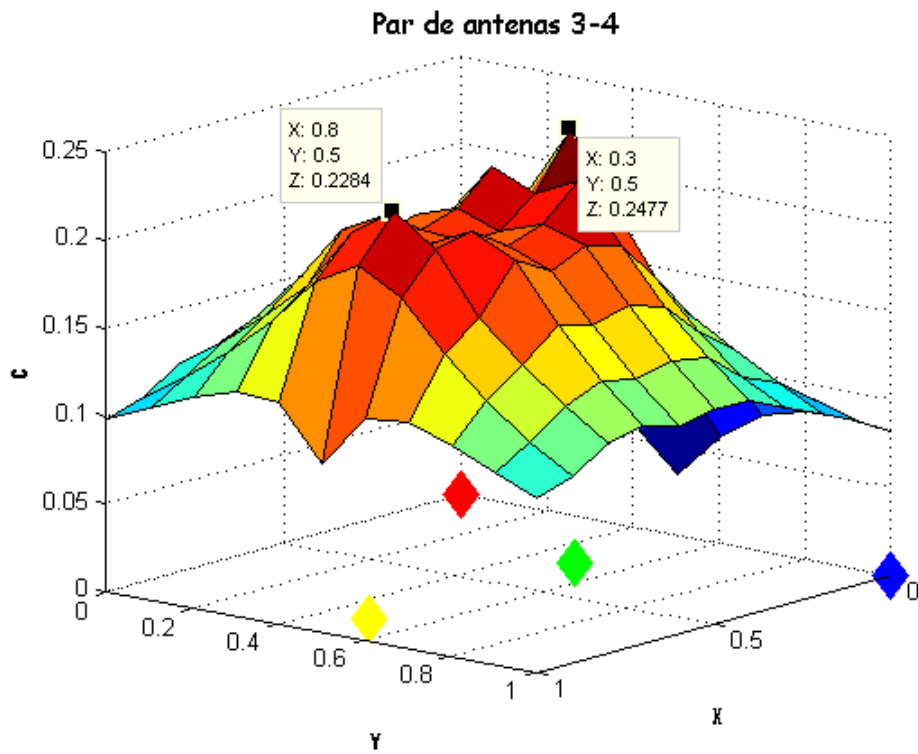


Figura 38. Representación en superficie de  $C$  para el par de antenas 3-4 de la distribución triangular.  
Fuente propia.

En último lugar, se vuelve a crear una nueva matriz `datostotal` consiguiendo como representación la mostrada en la figura 39. Como resultado, se vuelve a alcanzar que los máximos valores de  $dTDOAs$  se sitúan en el interior de esta nueva configuración analizada. El código empleado para este caso se recoge en el anexo 1 como código 5. Observando la figura 39 se aprecia que la superficie obtenida presenta simetría respecto del mismo eje que muestra su simetría el conjunto de las cuatro antenas que forman la distribución triangular.

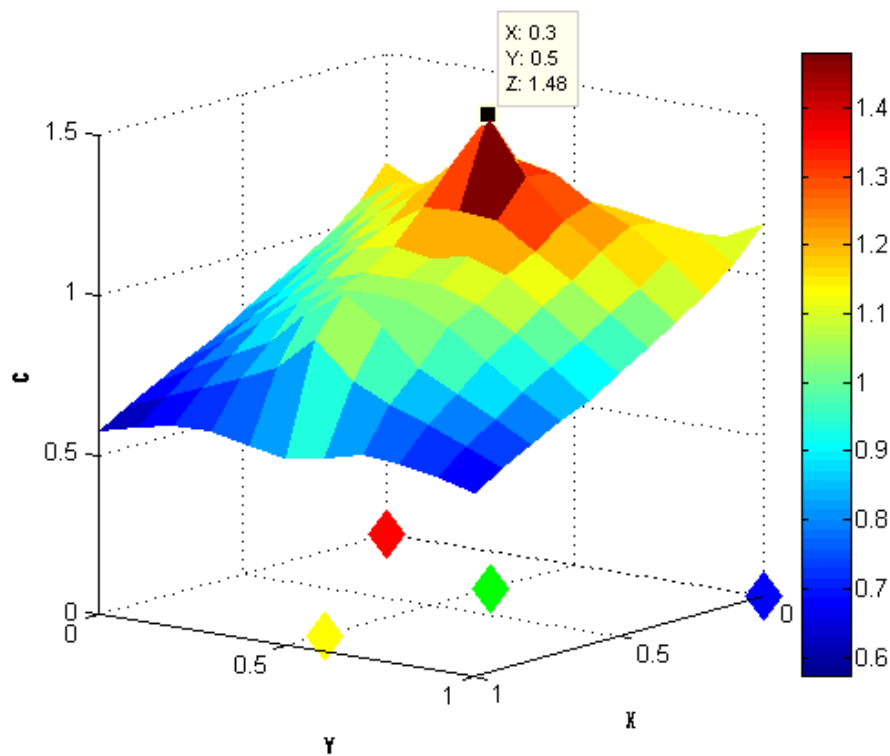


Figura 39. Representación en superficie de  $C$  para el conjunto de los pares de antenas de la distribución triangular. Fuente propia.

Analizando las figuras obtenidas al representar la matriz `datosTotal` tanto para la configuración cuadrada como triangular de antenas (figuras 31 y 39), se alcanzan las siguientes apreciaciones:

Por un lado, los máximos dTDOAs obtenidos en la distribución triangular se concentran en una única zona muy pronunciada que se distingue claramente del resto de la superficie. Por otro lado, los máximos dTDOAs registrados para la distribución cuadrada se distribuyen en 4 zonas que presentan simetría.

Por último, comparando los resultados obtenidos para la matriz  $C$  cabe destacar que el máximo error a cometer en el cálculo de los TDOAs se alcanza en la distribución triangular con un valor de 1,48 m frente al obtenido para la distribución cuadrada de 1,235 m.



## Capítulo 5

### Métodos para el cálculo de TDOAs teóricos

En el artículo escrito por Wagenaars et al. se afirma que « la precisión de la localización del defecto depende de la precisión de la estimación del tiempo de llegada de cada pulso». De este modo, resulta imprescindible ocupar este capítulo en la explicación de alguno de los métodos conocidos hasta el momento para calcular TOAs. En el artículo mencionado se distinguen varios métodos entre los que se encuentran: *detección por umbral*, *AIC* o *criterio de energía acumulada*. Todos estos métodos pueden ser aplicados en gran variedad de sistemas. Concretamente, en este artículo se usan para localizar la fuente de descargas parciales a lo largo de cables. [Wagenaars 2008: 1190]

Esta importancia de la medición correcta de los TOAs para conseguir una buena localización, se ha plasmado en los resultados registrados en proyectos anteriores. Los problemas en la localización de la fuente aparecían al cometer pequeños errores en el cálculo de los TDOAs, obteniendo como resultado la posición de la fuente desplazada incluso varios metros de la posición real.

Por todo lo mencionado anteriormente y partiendo de que en el método de Optimización por enjambre de partículas, los TDOAs se deberán conocer como datos de partida para aplicar este algoritmo de localización, en este capítulo se explican dos métodos muy importantes de cálculo de TOAs.

#### 5.1 Método de la energía con pendiente negativa

Las DPs liberan de forma brusca una cantidad de energía que se propaga a través del medio en forma de onda. El primer paso para aplicar el método descrito en este apartado, consiste en calcular la energía acumulada de una señal. En términos generales, cualquier señal registrada se divide en:

$$x_k = s_k + n_k \quad (11)$$

siendo  $x_k$  la señal discreta en el tiempo,  $s_k$  la señal del pulso de la DP libre de ruido y  $n_k$  el ruido. El subíndice  $k$  equivale a cualquier número entero desde 1 hasta el número total de muestras que forman la señal,  $N$ . [Wagenaars 2008: 1191]

Por lo tanto, la energía acumulada de una señal ( $E_x$ ) se corresponde con la suma de la energía acumulada del pulso de la DP ( $E_s$ ) y de la energía acumulada del ruido ( $E_n$ ) como se indica en la ecuación (12).

$$E_x = \sum_{k=1}^N x_k^2 = \sum_{k=1}^N s_k^2 + \sum_{k=1}^N n_k^2 = E_s + E_n \quad (12)$$

En la ecuación (13) se muestra el cálculo de la potencia media de la señal ( $P_x$ ) como la suma de la potencia del pulso de la DP ( $P_s$ ) y la potencia del ruido ( $P_n$ ). [Wagenaars 2008: 1191]

$$P_x = \frac{E_x}{N} = \frac{E_s}{N} + \frac{E_n}{N} = P_s + P_n \quad (13)$$

Una vez conocido cómo se calcula la energía acumulada de una señal y la potencia media, la ecuación (14) muestra la tendencia negativa característica de este método. [Wagenaars 2008: 1192]

$$EC_k = E_{x,k} - k \cdot P_x = \sum_{k=1}^N x_k^2 - k \cdot P_x \quad (14)$$

Este método se comprende mejor observando la curva obtenida al representar la ecuación (14) mostrada en la figura 40. El motivo de establecer una pendiente negativa se debe a querer localizar el principio de la señal en el mínimo global de la curva  $EC_k$ . Por tanto, en la figura 40 se identifica el tiempo absoluto en el que se registra la DP en el mínimo de la curva. De este modo, la curva  $EC$  decrece hasta encontrar el pulso de la perturbación, registrándose para este pulso un pico de energía en la energía acumulada.

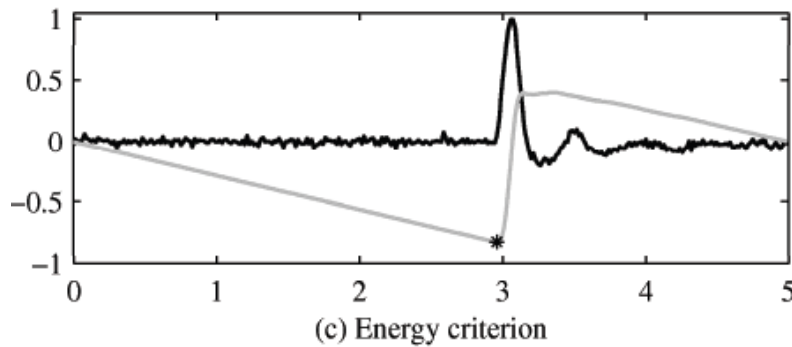


Figura 40. Curva  $EC_k$  de una señal.

Fuente: [Wagenaars 2008: 1192]

Sustituyendo la ecuación (11) en la ecuación principal de este método (14) y eliminando el ruido, se construye la ecuación final (15). El ruido se elimina de esta ecuación debido a que, por su invariabilidad en el tiempo, la recta correspondiente a su energía acumulada se anula al sumarle la misma recta pero con pendiente negativa. En definitiva, consiste en restar a la energía acumulada por las muestras de la señal, una recta con pendiente  $\frac{E_s}{N}$ , siendo  $E_s$  la energía acumulada total. [Wagenaars 2008: 1192]

$$EC_k = E_{s,k} + E_{n,k} - k \cdot P_s - k \cdot P_n = E_{s,k} - k \cdot P_s \quad (15)$$

El mínimo de la curva corresponde con el valor del TOA para el que se registra la DP y se halla derivando la ecuación (15) e igualando a cero (16), (17). [Wagenaars 2008: 1192]

$$\frac{dEC_k}{dk} = 0 \quad (16)$$

$$s_k^2 - P_s = 0 \quad (17)$$

Tras conocer el valor de los tiempos absolutos para los que cada una de las antenas ha captado la DP, simplemente basta con calcular las diferencias entre ellos para obtener los TDOAs.

### 5.1.1 El ruido electromagnético

Como en el apartado anterior se ha destacado el ruido como uno de los componentes de las señales, se dedica este apartado a una pequeña explicación del mismo. En este trabajo se considera el ruido electromagnético como ruido blanco, es decir, como una distribución uniforme de energía sobre el espectro de frecuencias. Este fenómeno dificulta la detección de las DPs cuando se realizan mediciones. En sistemas como subestaciones eléctricas, el proceso se lleva a cabo inevitablemente en presencia de este fenómeno, teniendo en cuenta que por ejemplo, se ve incrementado cuánto más cercana se encuentre la subestación a zonas urbanas. En la figura 41 se detalla el espectro del ruido de fondo junto a sus diferentes fuentes en una subestación típica. [Moore 2005: 2265]

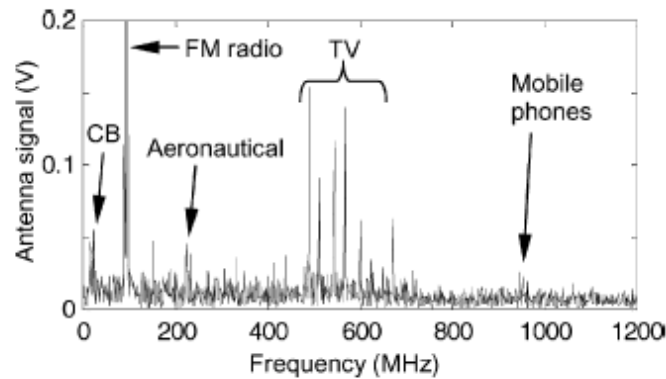


Figura 41. Espectro del ruido electromagnético.

Fuente: [Moore 2005: 2265]

El primer paso para localizar DPs se centra en estudiar el espectro del ruido electromagnético en ausencia de las mismas. De este modo, se calcula el valor promedio del ruido de la señal, siendo posible detectar las DPs cuando la energía aumenta considerablemente respecto al ruido medio de la señal previamente calculado.

## 5.2. Correlación de señales

En la etapa de procesado de señales surge la necesidad de comparar varias señales u observar la variación de su patrón a lo largo del tiempo, para todas estas necesidades se usa la correlación de señales. Sin embargo, aparecen problemas al emplear este método con señales reales. Fundamentalmente, el problema se centra en que las reflexiones debidas a la multipropagación de las señales dificultan el cálculo de los TDOAs. [Robles 2015: 9886]

Se distinguen dos tipos de correlación dependiendo de si se analiza una única señal o, en su defecto, dos señales diferentes. El primer tipo mencionado se denomina autocorrelación y, para un par de señales discretas, correlación cruzada.

Para dos señales discretas  $x(n)$  e  $y(n)$  la función de correlación cruzada se calcula tal y como se indica en la ecuación (18).

$$r_{xy}(l) = \sum_{-\infty}^{\infty} x \cdot (n + l) \cdot y(n) \quad (18)$$

siendo  $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

En el caso mencionado anteriormente en el que se trate de la misma señal discreta, la autocorrelación se calcula mediante la ecuación (19). [Soria 2003]

$$r_{xx}(l) = \sum_{-\infty}^{\infty} x \cdot (n + l) \cdot x(n) \quad (19)$$

### 5.2.1 Correlación cruzada con Matlab

En Matlab se usa la función `xcorr` para calcular la correlación de señales. Esta función necesita como entrada dos vectores de M elementos y devuelve como salida otro vector de 2M-1 elementos. El código que permite calcular los dos tipos de correlación detallados anteriormente es:

```
%Correlación cruzada de las señales x e y
rxy=xcorr(x,y)
%Autocorrelación de la señal x
rxx=xcorr(x)
```

En esta ocasión, el cálculo de los TDOAs se lleva a cabo en el código 6 empleando la función `xcorr` porque se van a emplear tres señales diferentes. En este nuevo código es necesario establecer el valor de algunos de los parámetros más importantes del procesamiento de señales como:

- La frecuencia de muestreo ( $f_s$ ) se define como la cantidad de muestras registradas por unidad de tiempo y se mide en Hz. El inverso de  $f_s$  se denomina tiempo o periodo de muestreo ( $T_s$ ) y se mide en segundos.
- El parámetro N hace referencia al número total de muestras que forman la señal. En esta ocasión, las señales creadas están formadas por un vector de 1000 muestras, valor escogido arbitrariamente.
- El número o índice de la muestra se obtiene como  $n = \frac{t}{T_s}$ .
- El periodo o tiempo de ventana ( $T_w$ ) se obtiene multiplicando el número de muestras por el periodo de muestreo.

En general, el programa se puede dividir en dos partes. En la primera parte, se busca obtener como resultado las señales registradas por las antenas partiendo de TDOAs conocidos. En la segunda parte, se pretende calcular los TDOAs mediante la función correlación en Matlab.

En la primera parte, se crean las señales ideales de las antenas mediante la función `zeros` rellenando todas las posiciones del vector como nulas y se tienen como dato varios parámetros como el número total de muestras,  $T_s$ ,  $t_1$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{23}$  y  $t_{13}$  para calcular el resto de tiempos absolutos. Posteriormente, se calcula el número de muestra n en la que se registra la DP mediante la función `índice`. Una vez obtenidos los valores de n, se modifican las señales dibujándolas como se representa en la figura 42.

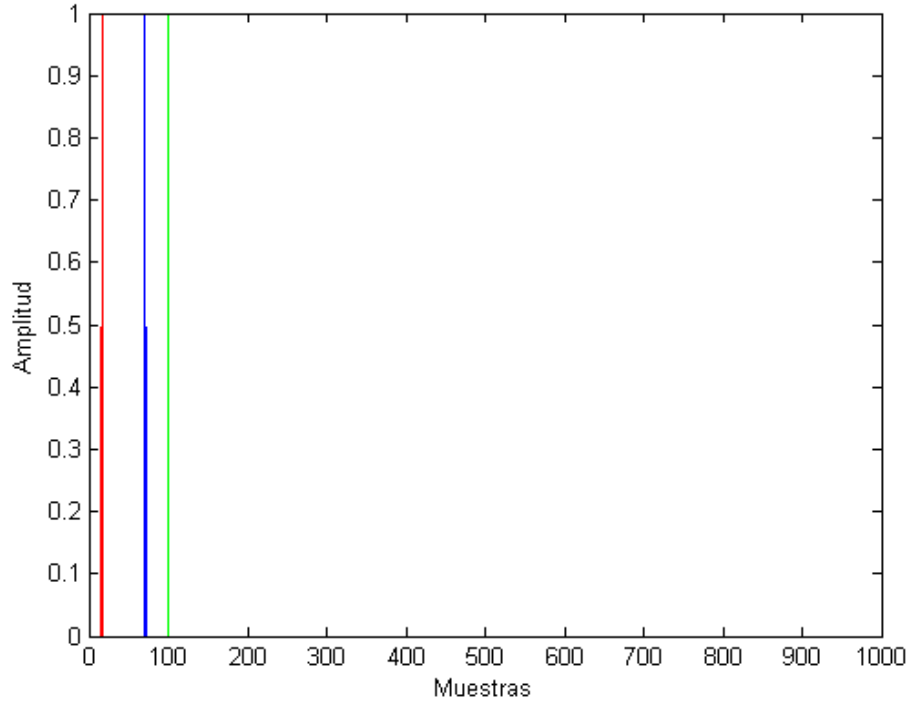


Figura 42. Señales creadas para el cálculo de TDOAs. Fuente propia.

Los tiempos absolutos  $t_2$  y  $t_3$  se calculan de una forma sencilla tal y como se indica en las ecuaciones (20) y (21). Estos tiempos absolutos son necesarios para calcular los índices de las otras dos antenas que registran la DP como a modo de ejemplo se muestra en la ecuación (22).

$$t_2 = t_1 - t_{12} \quad (20)$$

$$t_3 = t_1 - t_{13} \quad (21)$$

$$n_1 = \frac{t_1}{T_s} \quad (22)$$

La segunda parte del código sirve para mostrar cómo se calcula el tiempo de desfase entre señales con el método de correlación cruzada. La función `xcorr` se encarga de hacer un sumatorio de la multiplicación de la amplitud de una muestra de la señal  $x(n)$  por cada una de la amplitud de las muestras que forman la señal  $y(n)$  y, así, sucesivamente para todas las muestras de la señal  $x(n)$ . Como resultado se obtiene un nuevo vector que corresponde a una nueva señal en la que el impulso aparece desplazado un número de muestra denominado `ind`.

Para comprobar el valor obtenido para  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  y  $t_{23}$  es necesario calcular la diferencia entre el `ind` obtenido y el número de muestras total  $N$ , como se indica en la

ecuación (23). El valor de esta resta devuelve la diferencia de muestras para la que se registra el mismo impulso en las dos señales diferentes.

$$n_{ij} = ind - N \quad (23)$$

Por lo tanto, los TDOAs se obtienen simplemente como se indica en las ecuaciones (24), (25) y (26).

$$t_{12} = n_{12} \cdot T_s \quad (24)$$

$$t_{13} = n_{13} \cdot T_s \quad (25)$$

$$t_{23} = n_{23} \cdot T_s \quad (26)$$

Las figuras 43, 44 y 45 muestran los resultados obtenidos para la correlación cruzada entre las diferentes señales. Por lo tanto, el impulso aparece en estas figuras desplazado, correspondiendo el valor de X con el de la variable *ind*.

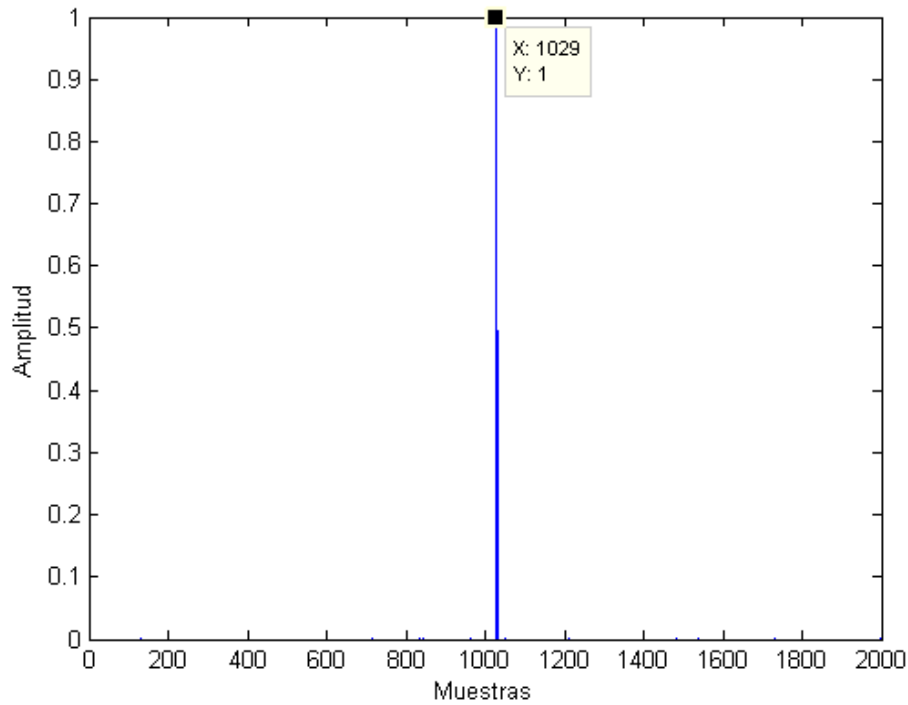


Figura 43. Correlación cruzada para el cálculo de  $t_{12}$ . Fuente propia.

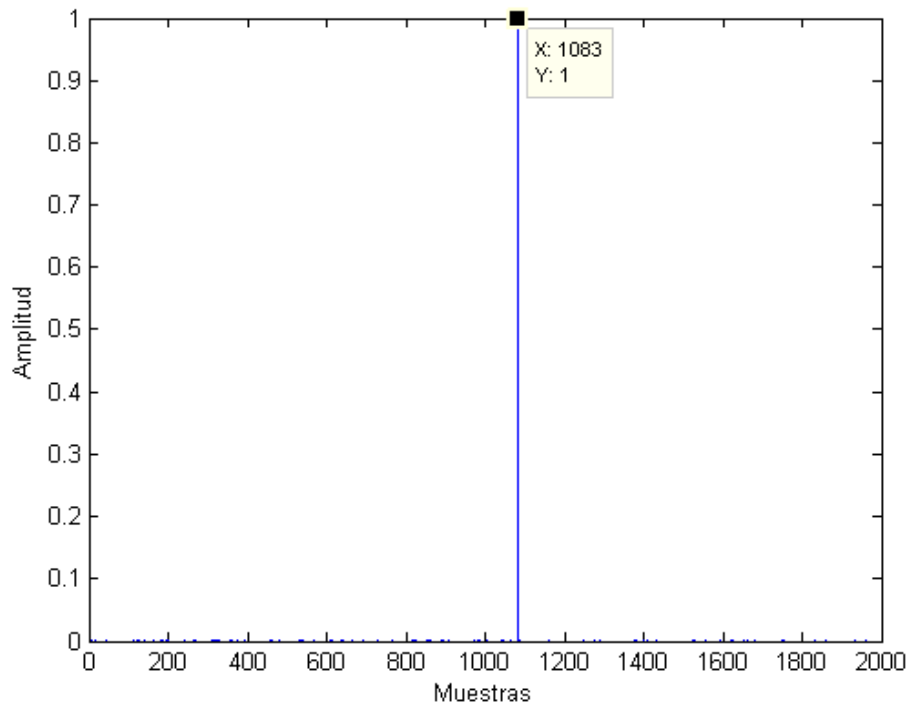


Figura 44. Correlación cruzada para el cálculo de  $t_{13}$ . Fuente propia.

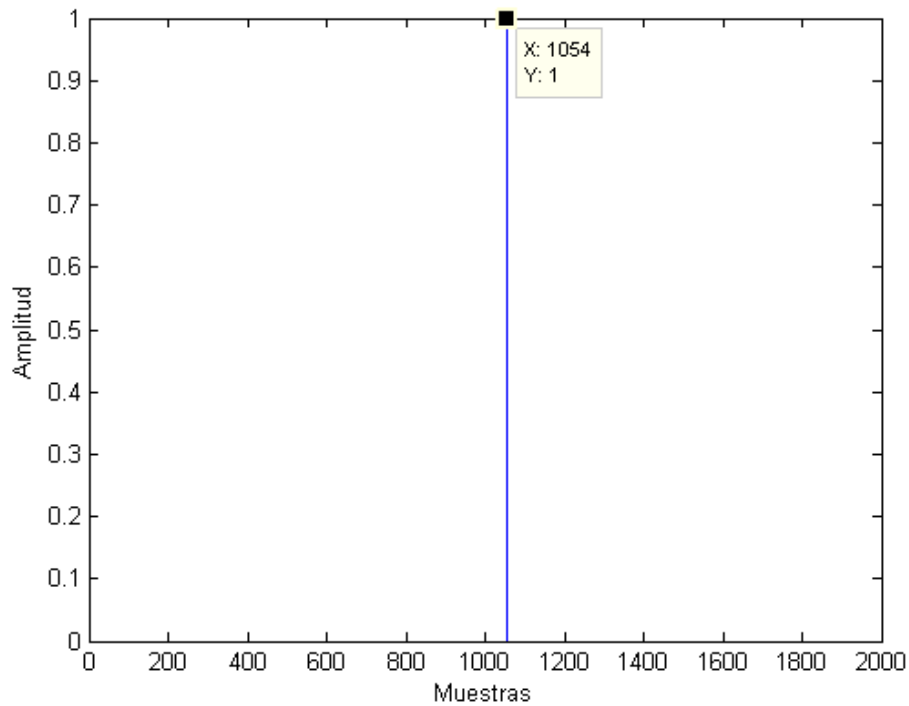


Figura 45. Correlación cruzada para el cálculo de  $t_{23}$ . Fuente propia.

Finalmente, se comparan los TDOAs obtenidos mediante la correlación de señales con los datos empleados en la primera parte del programa, los cuales tenían un



valor de:  $t_{12} = 2.8886 \text{ ns}$ ,  $t_{13} = 8.2574 \text{ ns}$  y  $t_{23} = 5.3688 \text{ ns}$ . La correlación de señales ofrece unos TDOAs prácticamente idénticos tal y como se puede comprobar:

$$t_{12} = 2.9 \text{ ns}$$

$$t_{13} = 8.3 \text{ ns}$$

$$t_{23} = 5.4 \text{ ns}$$

## Capítulo 6

### Optimización por enjambre de partículas

#### 6.1 Descripción del método

La exigencia de resolver un elevado número de problemas relacionados con la coyuntura científica actual, hace que la optimización se convierta en un objetivo muy importante y en el cual se debe seguir avanzando. Existen diferentes técnicas para resolver problemas de optimización como los métodos directos o los métodos iterativos. Por un lado, los métodos directos se emplean cuando se conocen todos los datos para alcanzar la solución óptima como ocurre en problemas lineales. Por otro lado, los métodos iterativos se utilizan para resolver problemas en los que resulta desconocido el modo de hallar la solución exacta o bien, cuando sea válida una solución aproximada. En muchas ocasiones, una solución exacta supone una gran inversión de tiempo que, en cierto modo, puede no ser necesaria. [CCIR/ITESM 2009]. Por su parte, los métodos iterativos parten de un valor estimado, el cual se espera que se aproxime a la solución del problema tras cálculos sucesivos.

En particular, este capítulo se centra en el análisis de un método iterativo heurístico y su aplicación en la localización de fuentes de descargas parciales. Los métodos heurísticos se centran en el análisis de la información disponible del problema para realizar la búsqueda de la solución en un tiempo razonable. [Riojas Cañari 2005]

El método de Optimización por enjambre de partículas, o bien PSO (*Particle Swarm Optimization*), se trata de un método heurístico que presenta como ventaja frente a otras técnicas de optimización, el hecho de trabajar en la búsqueda de la solución sin necesidad de emplear la derivada de la función a optimizar. El proceso ligado a este método evoca los movimientos llevados a cabo por animales en todas las escalas tales como insectos, bacterias, peces o aves. [Kennedy 1995: 39] Este método fue descrito en 1995 por James Kennedy y Russell Eberhart. En las figuras 46 y 47, se muestran ejemplos de desplazamientos realizados por diferentes poblaciones. PSO se centra en la imitación y el estudio de estos movimientos para resolver problemas de optimización.



Figura 46. Enjambre de abejas.

Fuente: [<http://optimizacionenjambredeparticulas.blogspot.com.es/#>]



Figura 47. Bandada de aves.

Fuente: [ <http://digitalmedia.fws.gov/cdm/>]

A parte de PSO, también existe otro método de optimización denominado *Ant Colony Optimization*, (ACO) que se encarga de estudiar el comportamiento de las colonias de hormigas. [Pérez Lopez 2005: 137]

Como indica Yaiza Martínez, «se denomina enjambrazón al movimiento espontáneo y organizado de un gran número de individuos» [2013]. La idea fundamental de PSO se centra en que cada uno de estos individuos (también denominados partículas) es capaz de recaudar la información que desprenden tanto los

individuos de su alrededor como incluso el propio entorno. De este modo, animales como los indicados anteriormente, son capaces de realizar movimientos imposibles de predecir. En la figura 48 se indica el orden de los pasos ejecutados en cada una de las iteraciones del algoritmo PSO, buscando imitar los movimientos de estos animales.

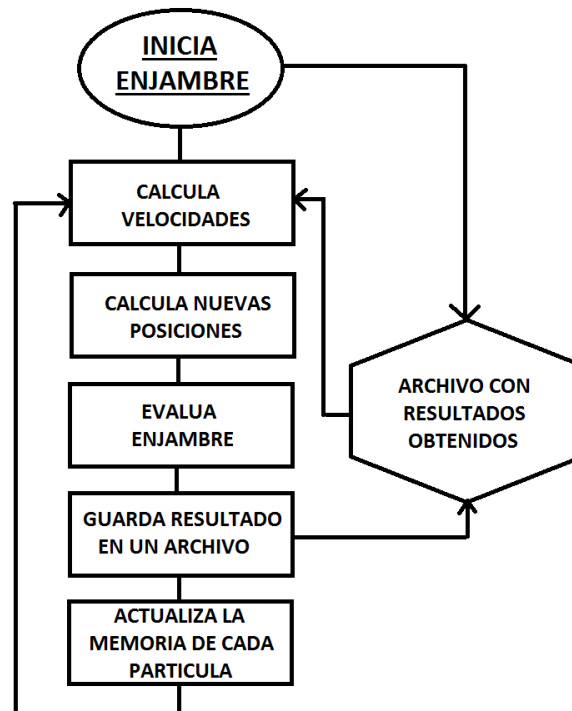


Figura 48. Diagrama de flujo de PSO.

Fuente: [<http://armandoquezadaromo.blogspot.com.es/2013/05/evidencia-6-diagramas-de-flujo-para-pso.html>]

El diagrama de flujo comienza con la inicialización de todos los datos relativos a las partículas del enjambre y continúa con el cálculo de la velocidad de cada partícula teniendo en cuenta tanto su mejor posición alcanzada hasta el momento como la posición óptima alcanzada por la mejor partícula de la población. Una vez obtenida la velocidad, se calculan las nuevas posiciones a las que se van a dirigir las partículas, analizando para cada una de ellas si este desplazamiento supone un resultado mejor o peor que el óptimo almacenado para cada una de ellas. Para analizar si la nueva posición de la partícula se traduce en un resultado más cercano o más alejado de la solución buscada, se calcula el valor de una función objetivo (definida según el problema a resolver) para cada una de las partículas. El resultado alcanzado por cada partícula se compara con su óptimo. En el caso de que la nueva posición, mejore el óptimo guardado hasta el momento, se actualizan los datos de la partícula en el enjambre. Todos estos

pasos se llevan a cabo para cada una de las iteraciones del método PSO realizadas. [Kennedy 1995: 40]

Las diferentes partículas hacen referencia a soluciones candidatas que se van moviendo por el espacio de soluciones. Este proceso se repite hasta que encuentra la solución deseada, sin conocer en cuantas iteraciones se va a alcanzar la solución. Este método permite solucionar problemas de grandes dimensiones y de los cuales se tengan poco conocimiento del problema analizado.

## 6.2 Modelo global (GBEST)

Con el fin de entender el funcionamiento de PSO, se implementa el código 7 del anexo 1 para hallar la ubicación de la fuente de descargas parciales S conociendo la posición de una configuración de antenas en el espacio. Concretamente, en la figura 49 se detalla la ubicación en el plano xy de las tres antenas A1, A2 y A3 que forman la configuración.

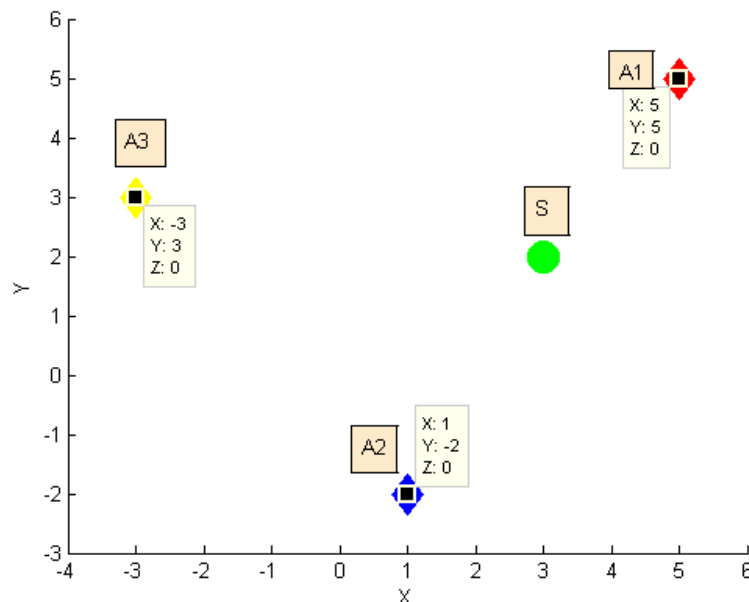


Figura 49. Distribución de la configuración de antenas empleada. Fuente propia.

Debido a que se pretende localizar la fuente de DPs en el plano xy es necesario emplear como mínimo tres antenas para la localización. En el caso de que se quisiese

realizar la localización de la fuente en tres dimensiones, se necesitaría incorporar otra antena más.

Tal y como se ha detallado en el apartado anterior, este método usa un enjambre de partículas para ir recorriendo el espacio de soluciones en busca de una solución óptima. En la localización de la fuente de DP, la solución se corresponderá con las coordenadas de S. Para alcanzarla, las partículas deberán modificar su velocidad en función de su mejor posición alcanzada y de la posición del mejor miembro del enjambre. El miembro del enjambre cuya posición es la óptima se denomina en el código 7 como *pmejor*. Por lo general, en la bibliografía consultada esta mejor partícula del enjambre se identifica como *gbest*.

### 6.2.1 Explicación del código 7

Para cualquier problema a resolver mediante este algoritmo se deben establecer los criterios que caracterizan la búsqueda de la solución. Estos criterios son:

-El tamaño del enjambre  $N$  influye en la exploración del espacio de soluciones. Un elevado número de miembros en la población implica un alto grado de exploración pero, también, conlleva la realización de muchas iteraciones hasta encontrar la solución. En general, las poblaciones usadas tienen un tamaño entre las 10 y 50 partículas, aumentado este valor entre 100 y 200 partículas para problemas complejos. [Pérez López 2005: 148]

-La función objetivo se trata de una ecuación a minimizar que depende del estudio realizado. Para este estudio, la función objetivo tiene como punto de partida la ecuación de localización descrita en el capítulo 2. Debido a que se va a llevar a cabo la localización de la fuente en el plano xy, la ecuación (2) queda reducida a la ecuación (27), es decir, eliminando la coordenada z.

$$c \cdot (t_a - \tau) = \sqrt{(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2} \quad (27)$$

Los subíndices “a” hacen referencia a las antenas y las incógnitas son tanto las coordenadas de S (x, y) como  $\tau$  (instante desconocido en el que empezó la propagación de la descarga parcial). Tal y como se explicó en el capítulo 2, haciendo uso de los TDOAs se elimina el instante desconocido de tiempo  $\tau$  en el que se produce la descarga parcial. Sustituyendo los tiempos relativos en la ecuación (27), se obtiene la función objetivo (28) empleada para llevar a cabo la localización.

$$\text{val} = ((t_{12} \cdot c) - (d_1 - d_2))^2 + ((t_{13} \cdot c) - (d_1 - d_3))^2 + ((t_{23} \cdot c) - (d_2 - d_3))^2 \quad (28)$$

Cada sumando de la función objetivo (28) representa la diferencia entre las igualdades (29), (30) y (31) para cada uno de los tres pares de antenas.

$$c \cdot t_{12} = d_1 - d_2 \quad (29)$$

$$c \cdot t_{13} = d_1 - d_3 \quad (30)$$

$$c \cdot t_{23} = d_2 - d_3 \quad (31)$$

siendo:

$$d1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (32)$$

$$d2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \quad (33)$$

$$d3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \quad (34)$$

[Moore 2005: 2267]

En este caso, la solución será alcanzada por aquella partícula que tenga la posición óptima. Esta posición óptima se corresponde con el valor nulo de la función objetivo (28) por tratarse de una ecuación formada por la resta de igualdades. Al ejecutar el código, el algoritmo resuelve la función objetivo para cada partícula durante varias iteraciones, entendiéndose por iteración la actualización de las posiciones y velocidades de todos los miembros del enjambre. El algoritmo para de realizar iteraciones cuando la posición de una partícula del enjambre anula la función objetivo. El control de las iteraciones es muy importante porque se trata del único modo de detener la búsqueda llevada a cabo por las partículas.

-El factor de corrección se trata de un parámetro que refleja cómo afecta a cada miembro del enjambre, el resto de miembros y su propia memoria en sus desplazamientos.[Pérez López 2005: 142]

-El factor de inercia hace referencia a la rapidez de la convergencia hacia la solución. No se trata de un factor para el que esté establecido rigurosamente qué valor es el más apropiado, depende tanto del objeto de estudio como de su situación.

Tras detallar los factores indicados anteriormente, en concreto para el caso estudiado, es necesario conocer como datos de partida los TDOAs de las señales para poder calcular el valor de la función objetivo para cada uno de los miembros del enjambre. Debido a que el caso descrito se trata de un estudio teórico y a que no se

dispone de señales registradas por las antenas, se debe establecer una alternativa que permita calcular los TDOAs.

Por lo tanto, se ha decidido situar la fuente en una posición conocida para obtener los TDOAs necesarios. En consecuencia, la mejor partícula del enjambre (cuya posición genere el valor nulo de la posición objetivo) deberá tener la misma posición que la que se ha establecido para la fuente en el código 7, S (3,2). Conociendo las posiciones de las antenas y de la fuente, se pueden calcular los TDOAs mediante las ecuaciones (29), (30) y (31) sustituyendo la velocidad de propagación en el aire como  $c=3 \cdot 10^8$  m/s. Para ello, es necesario obtener previamente las distancias existentes entre la fuente y cada una de las antenas. Estas distancias  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  entre A1 en (5,5) m, A2 en (1,-2) m, A3 en (-3,3) m y la fuente de DPs en (3,2) se obtienen sustituyendo cada coordenada en las ecuaciones (32), (33) y (34).

Otra alternativa para conocer unos TDOAs con los que implementar el algoritmo PSO sin necesidad de concretar una posición de la fuente, consiste en simular las señales que se registrarían por las antenas tras emitirse la DP. Debido a que cada antena presenta una posición en el espacio distinta respecto a la fuente, la DP será registrada por cada antena en instantes distintos de tiempo. Con el fin de simplificar las ondas captadas por las antenas, se pueden crear vectores de  $n$  muestras con todas sus posiciones nulas exceptuando aquella en la que se registra la DP, elevando a la unidad su amplitud. La creación de estas señales se indica en el código 8 del anexo 1 y su resultado se muestra en la figura 50.



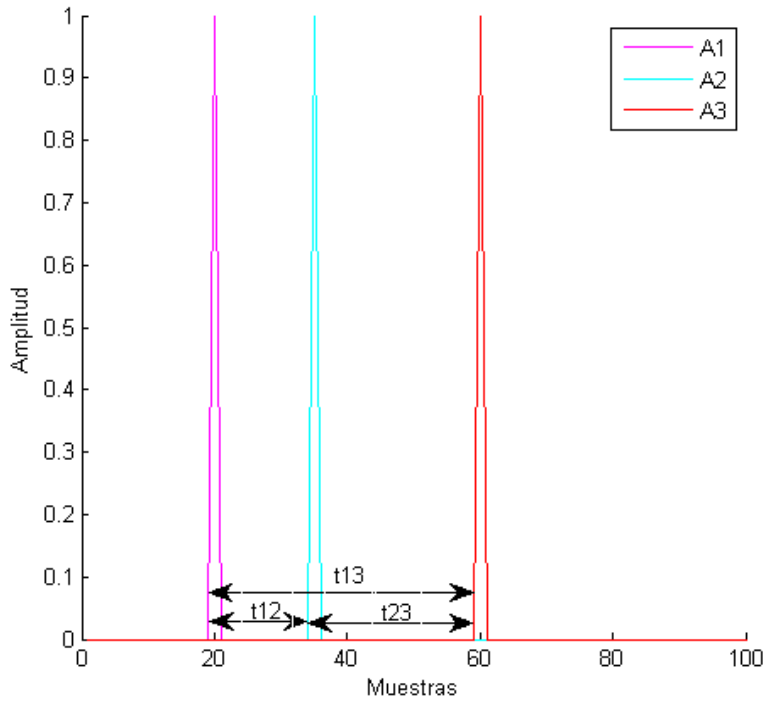


Figura 50. Señales creadas en Matlab para calcular los TDOAs de las cuatro antenas. Fuente propia.

Comparando las señales captadas desde la antena más cercana a la más lejana, se obtienen los TDOAs necesarios:  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  y  $t_{23}$ . Si se dispone de las señales reales registradas por las antenas, bastaría con aplicar cualquiera de los métodos descritos en el capítulo 5 para calcular los TDOAs.

Una vez conocidos los TDOAs, debe crearse una matriz para almacenar toda la información referente a cada miembro del enjambre a lo largo de la búsqueda por el espacio de soluciones. Esta información se organiza mediante una matriz con dos dimensiones, cuatro columnas y tantas filas como partículas se hayan definido. Por un lado, las columnas de la primera dimensión hacen referencia en el siguiente orden a: componente x de la posición actual de la partícula, componente x de la velocidad actual, componente x de la mejor posición (menor valor de la función objetivo) y, por último, este mejor valor de la función. Por otro lado, las columnas de la segunda dimensión hacen referencia en el siguiente orden a: componente y de la posición actual, componente y de la velocidad actual y componente y de la mejor posición (menor valor de la función objetivo). En particular, la variable `tam_enjambre` establece que 49 partículas forman la población con la que se va a trabajar, las cuales se muestran en la figura 51.

Cada una de las diferentes informaciones almacenadas en la matriz `enjambre`, se inicializa con unos valores. Las componentes x e y de la posición actual de todas ellas se completan con un bucle `for`, las componentes de la velocidad actual se igualan

a cero y la última columna correspondiente a los mejores valores de la función objetivo, se inicializa con un valor de 1000.

Tras la inicialización de los datos del enjambre, se debe establecer un criterio que permita controlar el número de iteraciones que se van a realizar hasta encontrar la solución buscada. Debido a que se desconoce el número de iteraciones necesarias para alcanzar la solución, se descarta la opción de emplear un bucle `for` estableciendo un bucle `while`. De este modo, se repetirá el cálculo del algoritmo mientras no se alcance un criterio establecido en el bucle `while`, dependiendo este criterio, del problema a solucionar. En el caso de la localización, la partícula que encuentre en primer lugar la posición de la fuente anulará la función objetivo. Esto implica que se deben seguir calculando nuevas iteraciones hasta que alguno de los valores de la función objetivo calculados para la posición de cada una de las partículas, sea nulo. La forma más práctica de comparar en el bucle `while` este criterio, consiste en calcular para cada iteración el mínimo valor de la función objetivo (almacenado en la primera dimensión, cuarta columna de la matriz `enjambre`) de todos los miembros del enjambre. Este valor se guarda en una variable denominada `temp` y mientras que `temp` sea mayor que cero, se siguen sucediendo las iteraciones. Finalmente, cuando la fuente de DPs sea encontrada, la variable `temp` valdrá cero y no se continuará con el cálculo de más iteraciones.

En la primera iteración de cada partícula el desplazamiento va a ser nulo porque en la matriz definida anteriormente, la velocidad se ha inicializado a cero. Sin embargo, para el resto de iteraciones, las nuevas posiciones hacia donde se van a mover las partículas van a depender tanto de las nuevas velocidades calculadas como de la posición en la que se encuentren en ese mismo instante. Tanto las nuevas posiciones como la velocidad que se debe adquirir se calculan por separado tanto para la componente x como para la componente y.

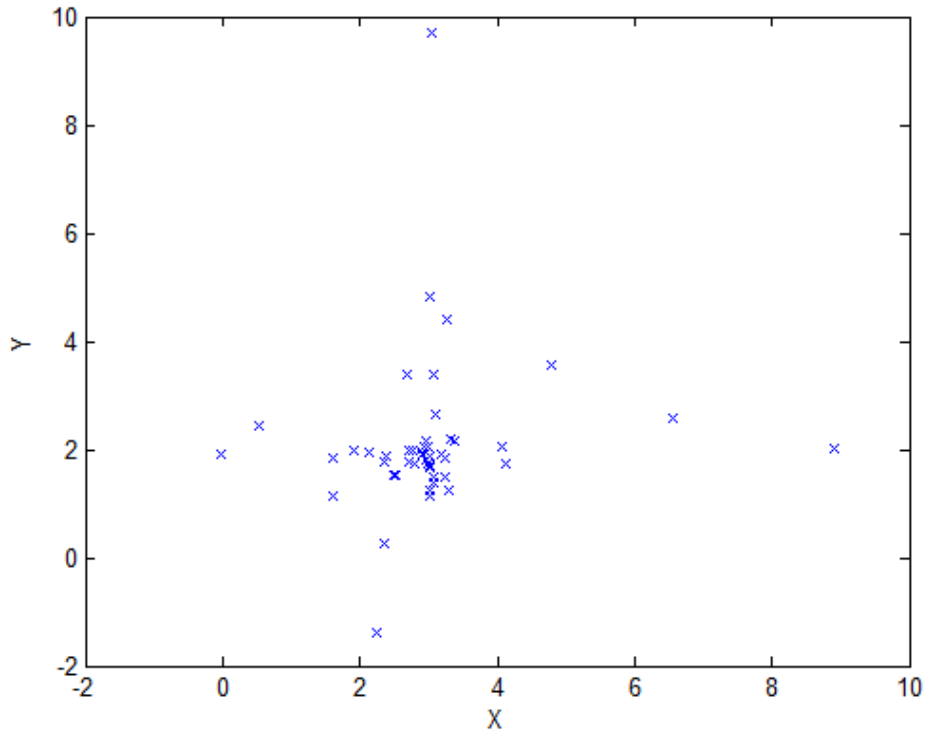


Figura 51. Enjambre de partículas recorriendo el espacio de soluciones. Fuente propia.

Tras calcular la nueva posición hacia donde se va a desplazar la partícula, se calculan las distancias  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$ , que representan las distancias entre cada partícula y las antenas. Estos datos se necesitan para introducirlos en la función objetivo siendo los únicos factores que van a variar con los cambios de ubicación de las partículas. La velocidad de propagación  $c$  y los desfases de tiempos  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  y  $t_{23}$  permanecen fijos.

Cada vez que se obtiene un nuevo valor de la función objetivo asociado al cambio de ubicación de una partícula, se compara este valor con el mejor valor guardado de la función objetivo para esa partícula hasta el momento. Si el valor obtenido es menor y, por tanto, se va minimizando la ecuación, se deben actualizar todos los datos de la tercera columna de la matriz `enjambre` relacionados con la mejor posición. Además, se actualiza la última de las columnas correspondientes al valor de la función objetivo para la mejor posición.

Una vez que se ha realizado este proceso para toda la población, se busca entre todas aquel valor más pequeño de la función objetivo (cuarta columna) para guardar en el índice `pmejor`, la fila para la que se ha dado. Tal y como se explicó anteriormente, la variable `temp` va guardando el mínimo de la función objetivo de la mejor partícula del enjambre en cada iteración.

Por último, se actualiza la velocidad de las partículas que van a adquirir en la nueva iteración para modificar sus posiciones en busca de la solución. Un modo de reflejar la naturaleza imprevisible y estocástica de las DP se basa en incluir números

aleatorios (*rand*) en el cálculo de las velocidades. La nueva velocidad de las partículas se obtiene tanto de la influencia de su experiencia particular como de la experiencia del mejor miembro del enjambre en ese momento. Esto queda reflejado en cada una de las partes que forman la ecuación (35) que permite el cálculo de la velocidad.

$$\begin{aligned} \text{enjambre}(i, 2, 1) = & \text{rand} * \text{inercia} * \text{enjambre}(i, 2, 1) \\ & + \text{factor\_correccion} * \text{rand} * (\text{enjambre}(i, 3, 1) - \text{enjambre}(i, 1, 1)) + \\ & \text{factor\_correccion} * \text{rand} * (\text{enjambre}(\text{pmejor}, 3, 1) - \text{enjambre}(i, 1, 1)); \end{aligned} \quad (35)$$

En el primer sumando de la ecuación (35) aparece la velocidad que lleva en ese momento la partícula. En el segundo sumando se calcula la diferencia entre la mejor posición hasta el momento alcanzada por esa partícula y su posición actual. Por último, en el tercer sumando se obtiene la diferencia de posiciones entre la mejor partícula del enjambre y la suya actual.

Este proceso se repite hasta que la variable *temp* valga cero. En ese momento, la partícula *pmejor* habrá encontrado la solución deseada. Finalmente, *pmejor* habrá localizado la posición en la que se encuentra la fuente de DPs coincidiendo con la establecida al principio en S(3,2) , tal y como se muestra en la figura 52.

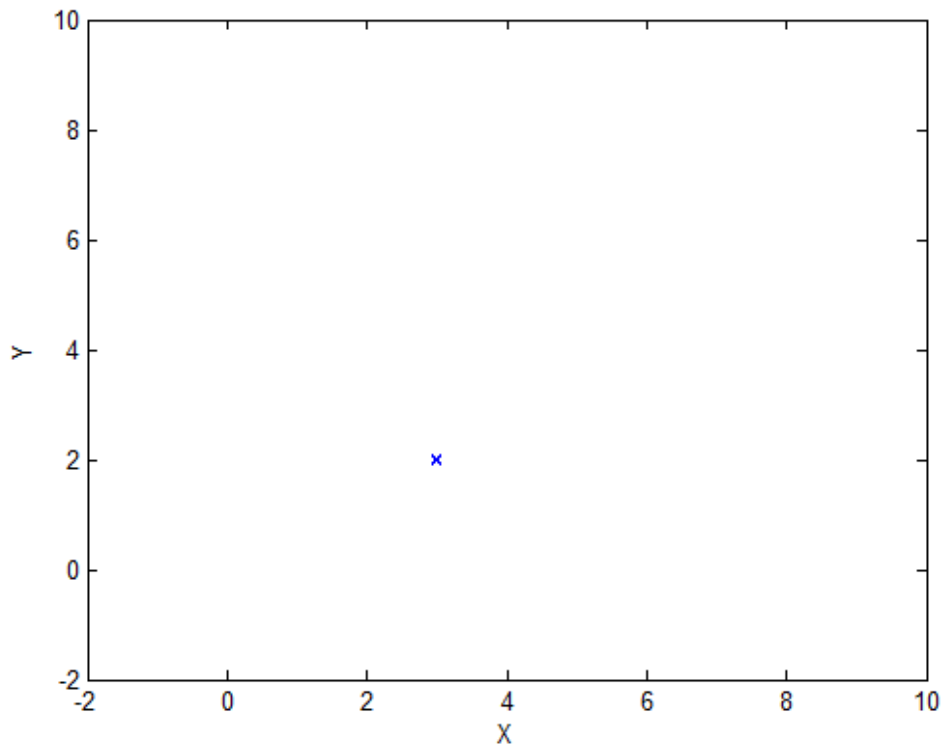


Figura 52. Solución encontrada por la partícula *pmejor* . Fuente propia.

### 6.3 Modelo local (LBEST)

Existen dos modelos diferentes de PSO en función del tipo de información empleada por cada una de las partículas para alcanzar la solución, el modelo *gbest* y el modelo *lbest*.

Por un lado, el modelo *gbest* se trata de la forma original implementada para este método de optimización y corresponde al método explicado a lo largo de este capítulo. Para este modelo se establece que cada partícula modifica su posición teniendo en cuenta tanto su mejor posición alcanzada como la ubicación de la mejor partícula del enjambre. En este caso, el conocimiento global y la interacción entre todos los miembros son primordiales. En concreto, la variable `pmejor` del código 7 es la que contiene la información de la mejor partícula.

Por otro lado, el modelo *lbest* se trata de una variante del original centrado en la interacción de cada partícula con un grupo de partículas de su alrededor pero no con todo el enjambre. En esta ocasión, cada partícula tiene en cuenta, a parte de su mejor posición alcanzada hasta el momento, la correspondiente a la mejor partícula cercana a ella. En este caso, se sustituye la variable *gbest* por *lbest* tratándose de la mejor partícula de su alrededor. Este modelo local nace de que, en ciertas ocasiones, pequeños grupos de partículas se distancian del conjunto tomando diferentes direcciones respecto al resto. Se puede caracterizar como un estudio más flexible frente al modelo global porque tiene más en cuenta los pequeños cambios en las proximidades de cada miembro en lugar de cambios más generales. [Kennedy 1995: 41]

En el artículo consultado escrito por los creadores de PSO en 1995, tras comparar ambos modelos, se confirma que obtener un óptimo local implica un mayor número de iteraciones que obtener un óptimo global. Esto implica que la convergencia a la solución se alcanza de un modo más rápido en el modelo original *gbest*. También existen diferentes modificaciones del modelo local basadas en establecer más o menos partículas alrededor de cada partícula, con el fin de formar grupos cercanos más o menos numerosos.[Kennedy: 41- 42]

## Capítulo 7

### Modificación de factores en PSO

#### 7.1 Factores variables en PSO

En PSO resulta de gran importancia la elección del valor del factor de inercia y del factor de corrección debido a que, según sean estos valores, la solución se alcanza en un mayor o menor número de iteraciones. El propósito de este nuevo capítulo se centra en comparar y analizar el número de iteraciones necesarias para localizar la fuente de DPs en función de los valores establecidos para ambos factores.

El valor del factor de inercia y el valor del factor de corrección influyen en la relación existente entre la exploración del espacio de posibles soluciones y la convergencia a la posición de la fuente. En general, el mejor conjunto de valores registrará un menor número de iteraciones. Para llevar a cabo este análisis, se analizan diferentes casos guardando el número de iteraciones necesarias hasta lograr que una partícula alcance una posición que anule la función objetivo mediante un contador  $k$ , añadido en el nuevo código 9. Se debe tener en cuenta que el cálculo de la velocidad a la que debe moverse cada partícula, está afectado por números aleatorios; por lo tanto, cada ejecución del programa ofrece un valor distinto para el número de iteraciones.

Un modo de analizar la rapidez de la convergencia de cada uno de los casos consiste en registrar gráficamente el valor de la función objetivo para cada una de las iteraciones. De esta manera, resulta necesario crear un vector denominado `valorfinal` para almacenar este valor. Finalmente, se representa para cada uno de los casos estudiados el número de iteraciones frente a los valores de la función objetivo en cada una de ellas.

## 7.2 Casos planteados

Tal y como se indicó anteriormente, el número de iteraciones varía para un mismo caso. En Matlab se han realizado un total de 5 ejecuciones para cada caso con el fin de poder llevar a cabo las comparaciones pertinentes entre ellos.

<b>CASOS</b>	<b><i>inercia</i></b>	<b><i>factor_correccion</i></b>	<b><i>K(número iteraciones)</i></b>	<b><math>\bar{k}</math></b>
<b>1</b>	2	2	No converge	-
<b>2</b>	2	1	No converge	-
<b>3</b>	1	2	127-129-129-131-130	129,2
<b>4</b>	1	1	91-101-101-100-98	98,2
<b>5</b>	1	0,5	105-102-106-107-97	103,4
<b>6</b>	1	0,25	No converge	-
<b>7</b>	1	3	No converge	-
<b>8</b>	10	30	No converge	-
<b>9</b>	0,5	2	75-73-71-72-70	72,2
<b>10</b>	0,5	1	63-63-64-64-61	63
<b>11</b>	0,25	1	No converge	-
<b>12</b>	0,8	1	82-77-81-79-80	79,8

Tabla 4. Casos calculados variando los factores de inercia y de corrección de PSO.

En todos los casos planteados se ha intentado ver cómo se ve afectado el número de iteraciones al mantener uno de los dos parámetros constante, mientras se varía el otro. En los dos primeros casos, se ha comprobado que independientemente del valor del factor de corrección, el algoritmo no converge para un valor de la inercia mayor a la unidad. Por otro lado, manteniendo la inercia igual a la unidad y disminuyendo el valor del factor de corrección desde 1 hasta 0,5, el algoritmo converge alrededor de las 100 iteraciones. Sin embargo, disminuyendo el factor de corrección a 0,25 no se alcanza la convergencia. En último lugar, se ha continuado probando disminuyendo la inercia hasta 0,5 encontrando como mejor caso, el número 10.

Como conclusión, la mejor relación entre exploración y convergencia se alcanza con un factor de inercia de 0,5 y un factor de corrección igual a 1. Con estos parámetros del caso 10 se alcanza la solución en una media de sólo 63 iteraciones.

### 7.2.1 Representación de los casos planteados

En las gráficas mostradas a continuación aparecen los casos que han convergido hasta la solución de todos los indicados en el apartado anterior. En el eje y se registra la variable `temp` guardando los valores de la función objetivo para cada una de las iteraciones.

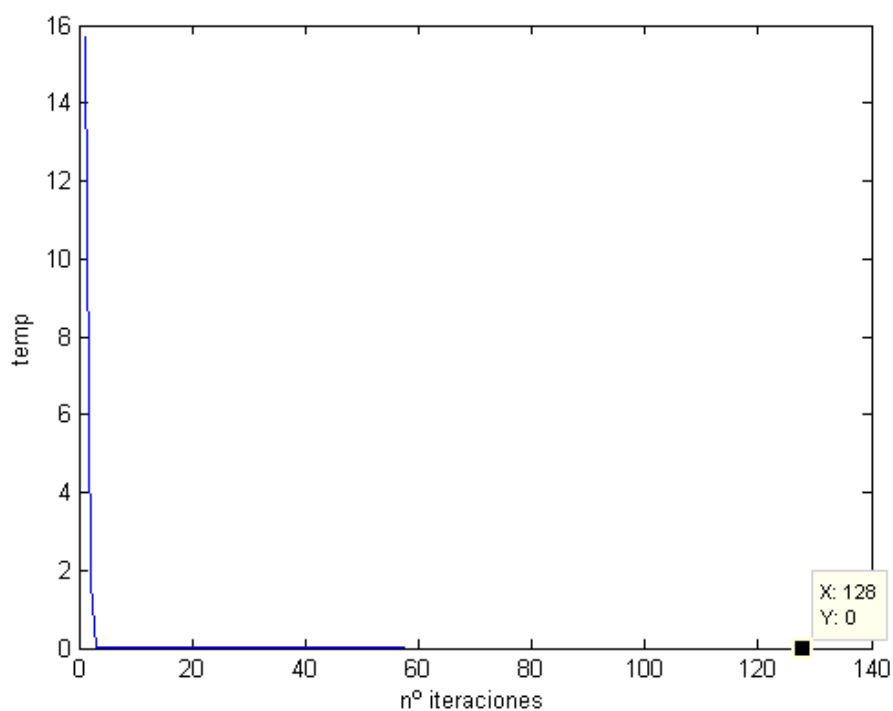


Figura 53. Número de iteraciones para el caso 3. Fuente propia.

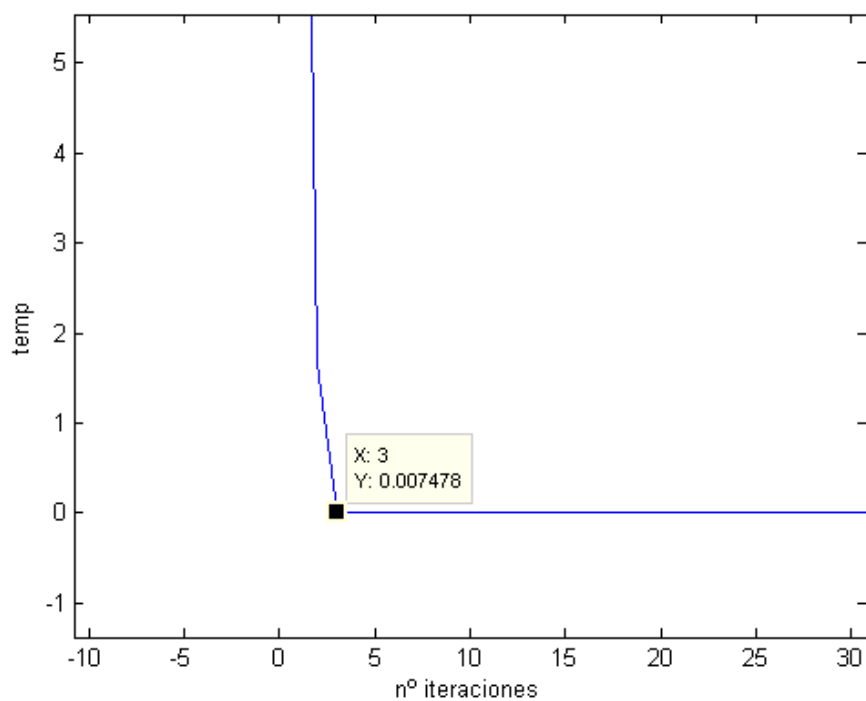


Figura 54. Iteración para la que el caso 3 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. Fuente propia.



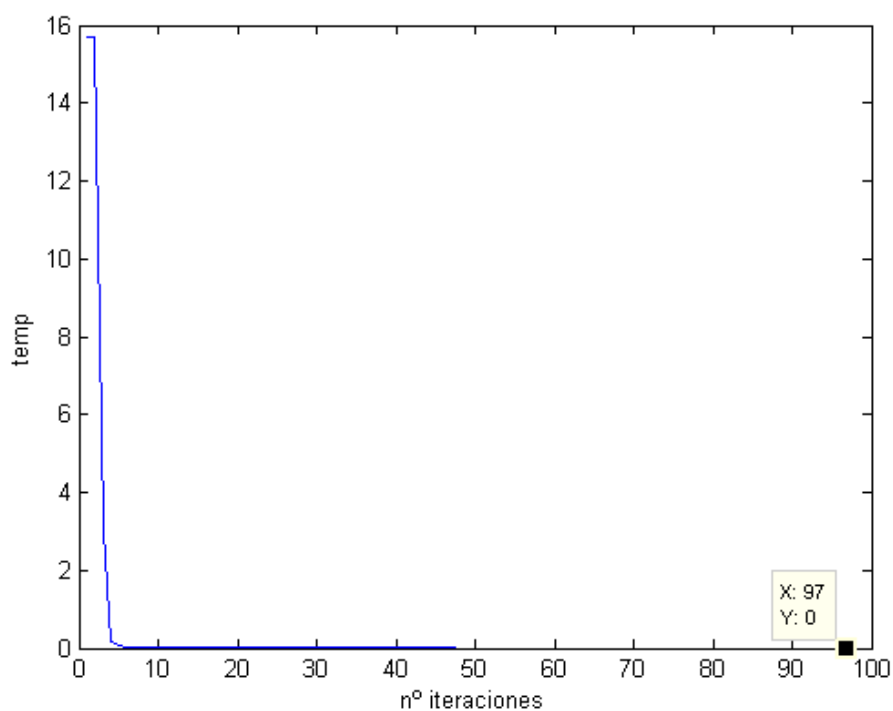


Figura 55. Número de iteraciones para el caso 4. Fuente propia.

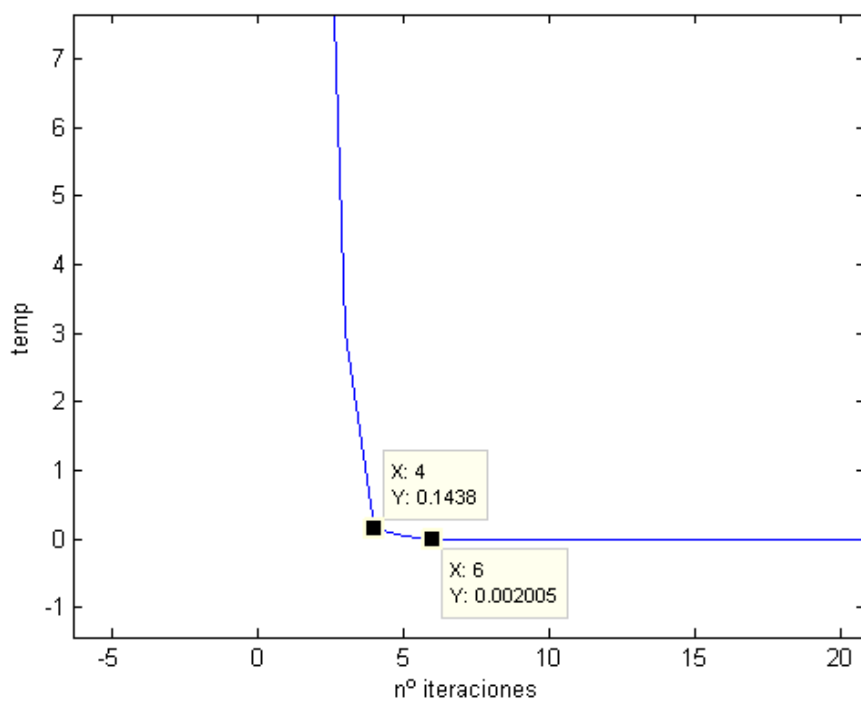


Figura 56. Iteraciones para las que el caso 4 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. Fuente propia.

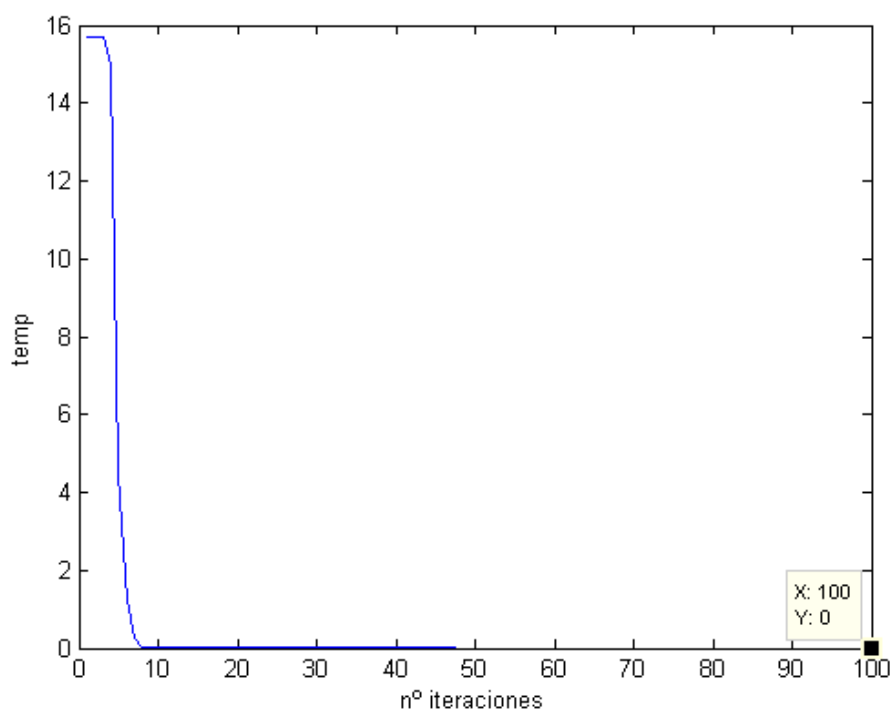


Figura 57. Número de iteraciones para el caso 5. Fuente propia.

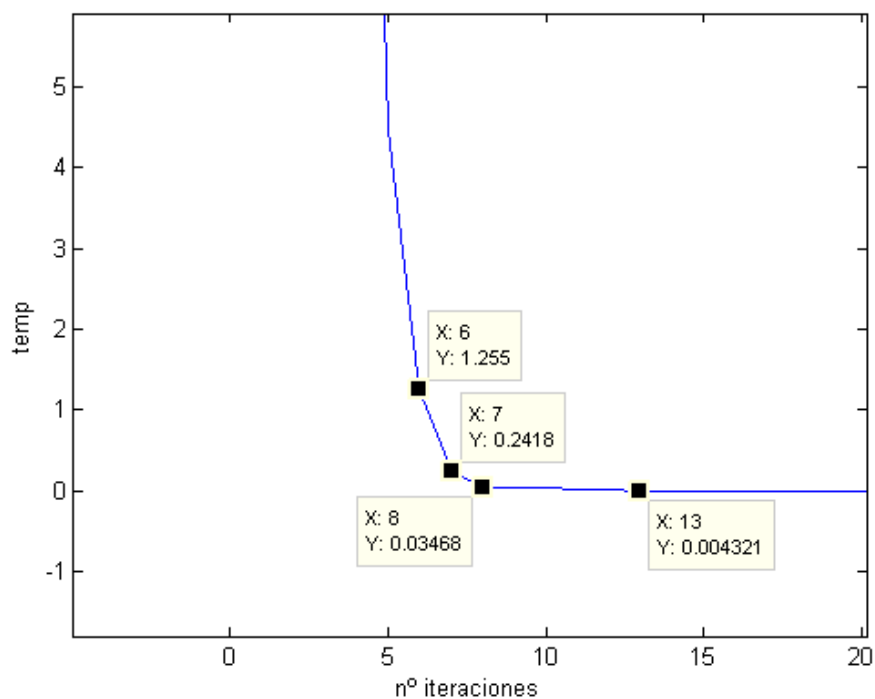


Figura 58. Iteraciones para las que el caso 5 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. Fuente propia.

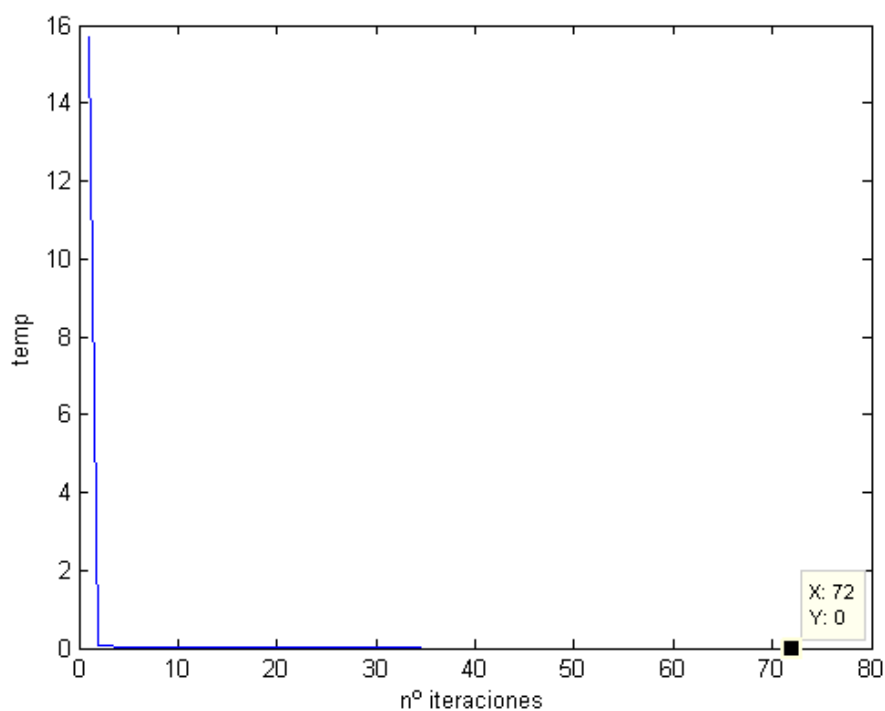


Figura 59. Número de iteraciones para el caso 9. Fuente propia.

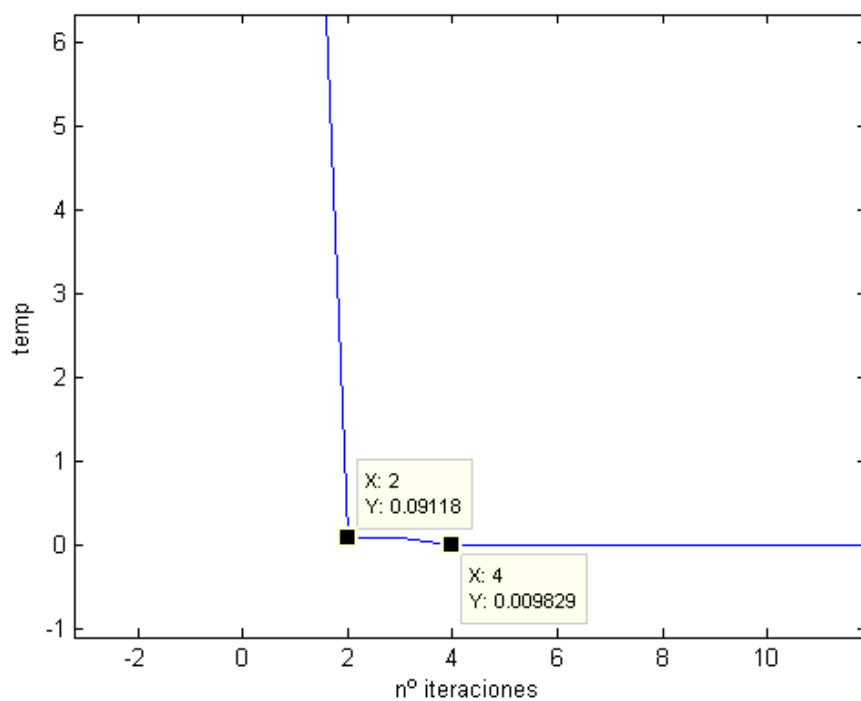


Figura 60. Iteraciones para las que el caso 9 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. Fuente propia.

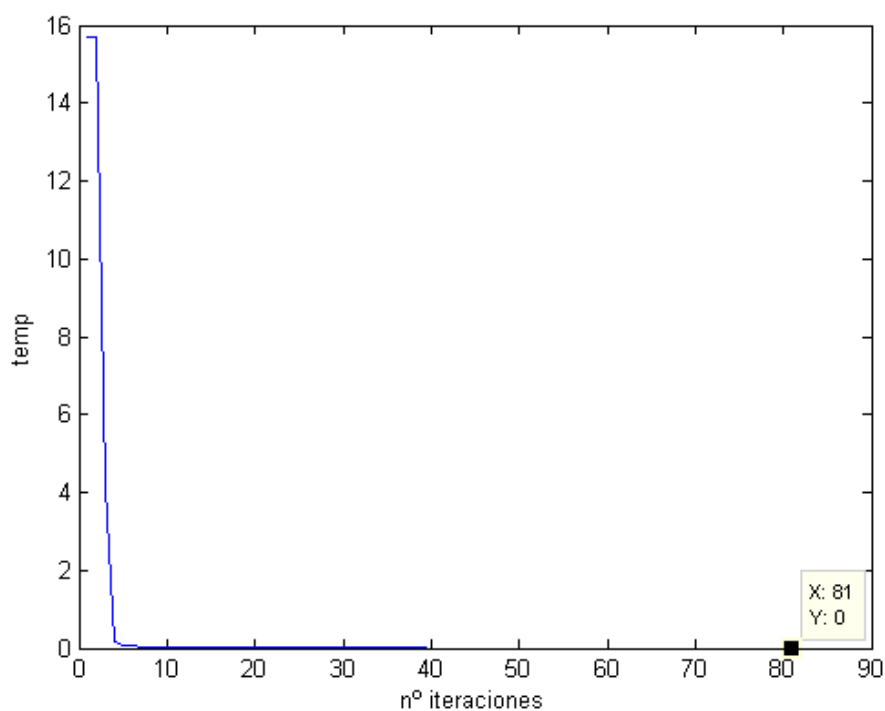


Figura 61. Número de iteraciones para el caso 12. Fuente propia.

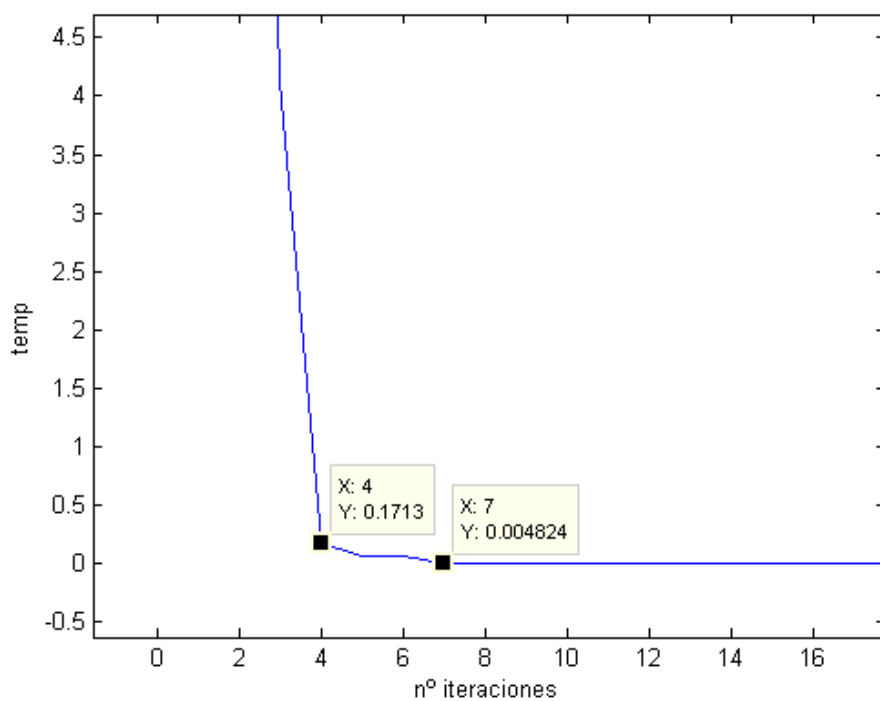


Figura 62. Iteraciones para las que el caso 12 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. Fuente propia.

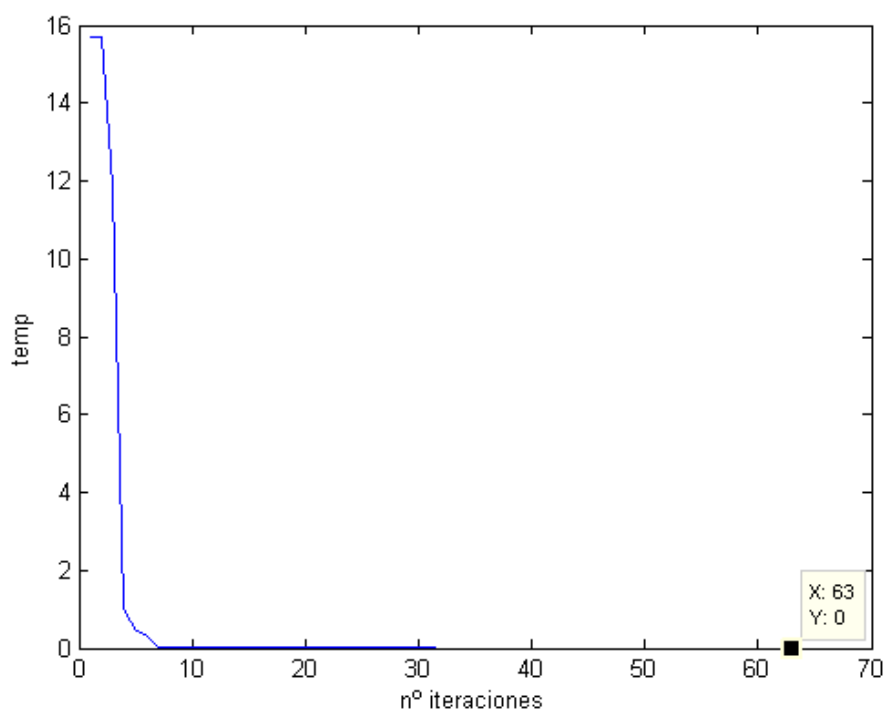


Figura 63. Número de iteraciones para el caso 10. Fuente propia.

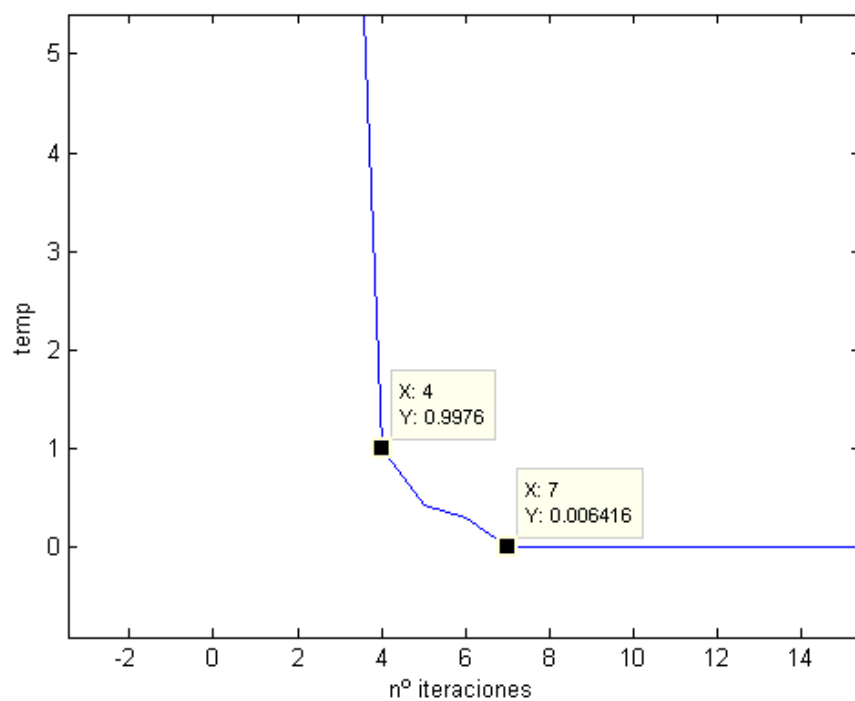


Figura 64. Iteraciones para las que el caso 10 se aproxima al valor nulo de la función objetivo. Fuente propia.

Se pueden emplear las figuras obtenidas de los diferentes casos para realizar comparaciones entre ellos. Por un lado, si se compara el caso 3 con el caso 4, se aprecia que, a pesar de que en  $k=3$  (caso 3)  $t_{\text{emp}}$  ya presenta un valor de 0,007 m, no se alcanza la solución hasta la iteración 128. Sin embargo, para el caso 4 no es hasta la iteración número 6 cuando  $t_{\text{emp}}$  tiene un valor de 0,002 m pero, encuentra la solución antes que el caso 3. Por otro lado, si se compara la mejor combinación obtenida (caso 10) con el caso 4, hasta  $k=7$  no se obtiene un valor de 0,006 m pero en 63 iteraciones se encuentra la solución.

### 7.3 Simulación de un caso real

En este apartado se modifican los TDOAs un 1 % con el fin de introducir los errores propios de la toma de medidas. Los nuevos TDOAs son los parámetros  $t_{12\_}$ ,  $t_{13\_}$  y  $t_{23\_}$  frente a los TDOAs teóricos empleados en los casos planteados anteriormente.

Con los TDOAs exactos, el algoritmo siempre alcanza el valor nulo de la función objetivo. Sin embargo, en esta simulación de un caso real, se establece un valor de  $1 \cdot 10^{-9}$  como valor de la función objetivo para la última iteración realizada. Los nuevos TDOAs no van a alcanzar nunca el valor nulo de la función objetivo. El código para este apartado es el código 10, el cual incluye el mejor conjunto de valores para el factor de inercia y el de corrección obtenidos para el caso 10.

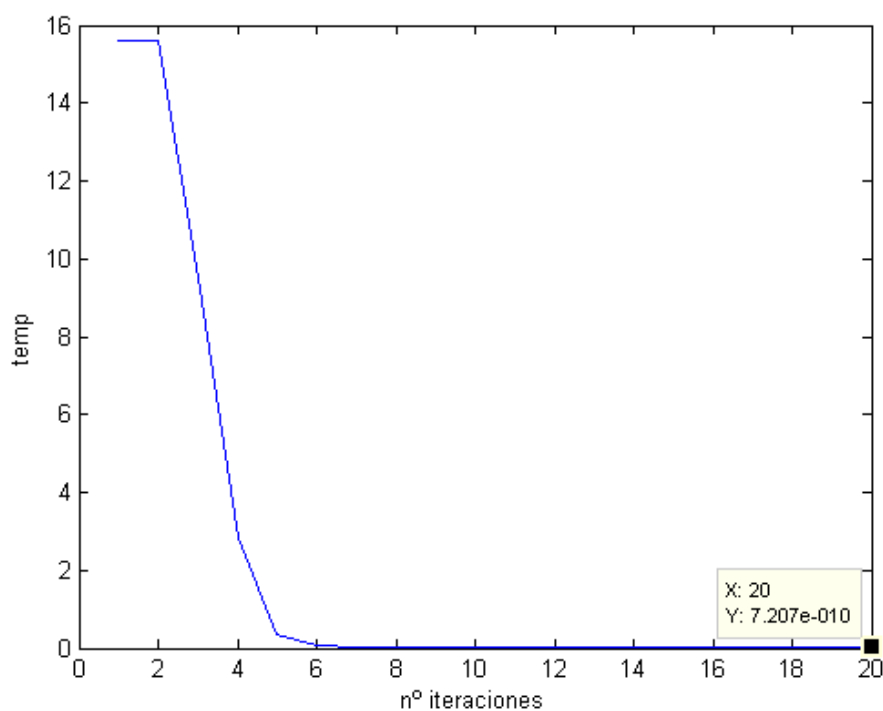


Figura 65. Número de iteraciones realizadas en la simulación real. Fuente propia.

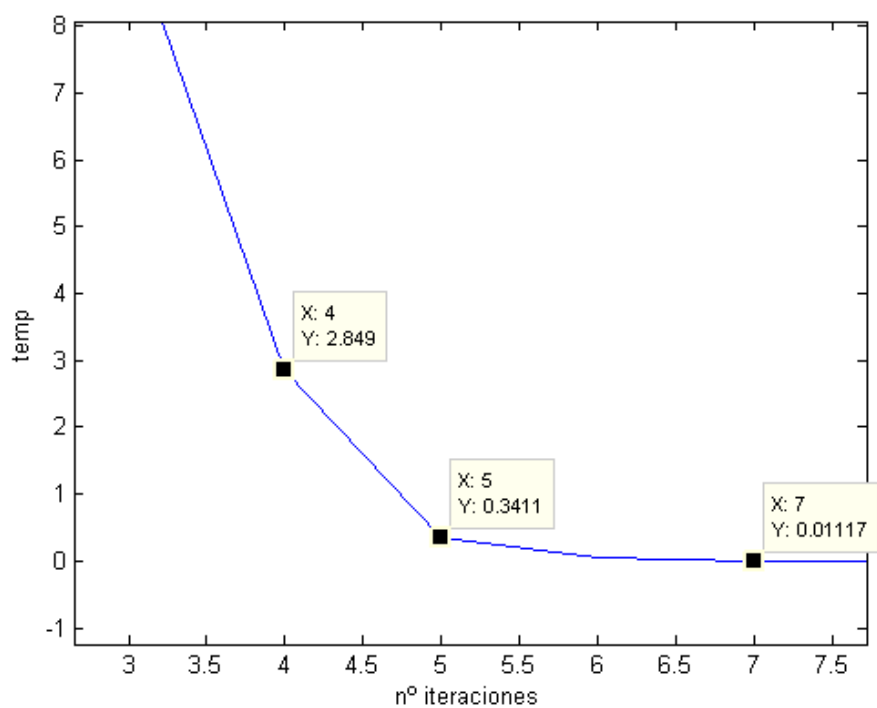


Figura 66. Iteraciones para las que la simulación real se aproxima al valor nulo de la función objetivo. Fuente propia.

## Capítulo 8

### Medida de TDOAs reales

#### 8.1 Descripción de elementos usados en el laboratorio

Como parte final de este proyecto, se ha llevado a cabo la medida de descargas parciales en el laboratorio de alta tensión de la universidad. El fin es localizar la fuente de DPs empleando el algoritmo PSO con TDOAs reales.

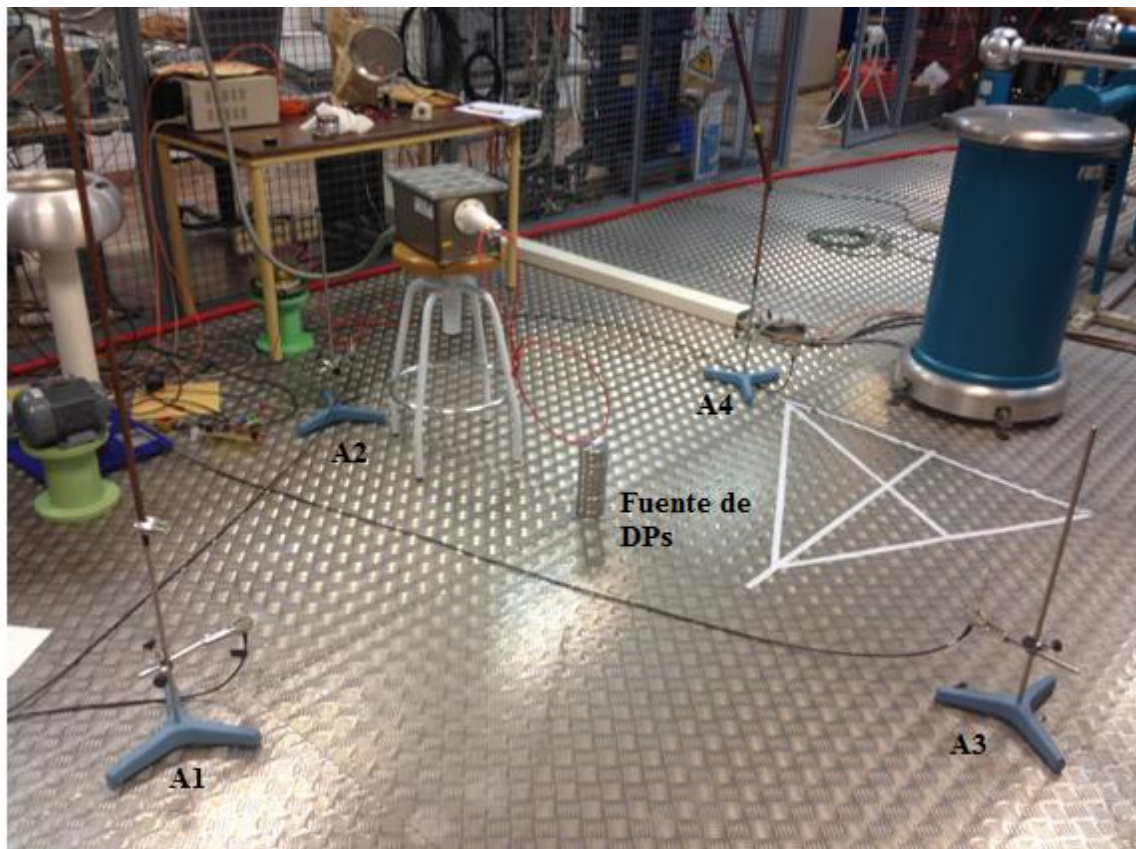


Figura 67. Disposición de las antenas y la fuente en el laboratorio. Fuente propia.



En la figura 67 se presenta el sistema montado para la detección de DPs compuesto por los siguientes elementos:

En primer lugar, un transformador recibe tensión de la fuente de alimentación y a su salida se conecta un cable de color rojo, como se muestra en la figura anteriormente indicada.

En segundo lugar, la emisión de DPs se origina al colocar un hilo de cobre conectado a tierra rodeando al cable rojo. Esta emisión se debe a que la unión entre el cable y el hilo da lugar a una cavidad de aire sometida a una gran diferencia de tensión. Las DPs se producen como consecuencia de la diferencia de tensión existente en esa zona de aire existente entre el cable y el hilo (0 V). En la figura 68 se observa la sección de la unión apreciándose la cavidad de aire de color azul entre el hilo de cobre (negro) y el cable rojo.

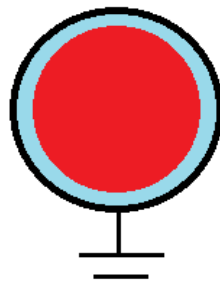


Figura 68. Sección de la unión entre el cable y el hilo de cobre. Fuente propia.

En tercer lugar, cuatro antenas denominadas A1, A2, A3 y A4 son las encargadas de registrar las DPs. Cada antena está formada por un hilo de cobre soldado a un conector de cable coaxial apantallado. Debido a que todas las antenas se encuentran colocadas a la misma altura, la localización de la fuente de DPs se realiza en el plano siendo las incógnitas a hallar  $(x_s, y_s)$ .

En último lugar, el osciloscopio Tektronix DPO 7254 sirve para registrar las DPs. Cada una de las antenas se corresponde con uno de los canales de entrada del osciloscopio. Concretamente, la señal captada por la antena A1 (-1,0) se pinta de color amarillo (canal 1), la señal de la antena A2 (0,1) de color azul (canal 2), la de la antena A3 (0, -1) de color morado (canal 3) y la de la antena A4 (1,0) de color verde (canal 4).

## 8.2 Localización de la fuente de DPs mediante PSO

En este ensayo el objetivo es medir los desfases de tiempo reales entre el registro de las DPs por parte de las cuatro antenas, es decir, los TDOAs reales. Esto se debe a que los TDOAs son los datos de partida empleados por el método de Optimización por enjambre de partículas para localizar la fuente de DPs. Por lo tanto, en este capítulo se vuelve a emplear como herramienta PSO.

La configuración de las antenas y de la fuente de DPs montada en el laboratorio se ha dibujado en Matlab en la figura 69. El origen de coordenadas se sitúa en la fuente de DPs y, por lo tanto, las cuatro antenas se encuentran rodeándola.

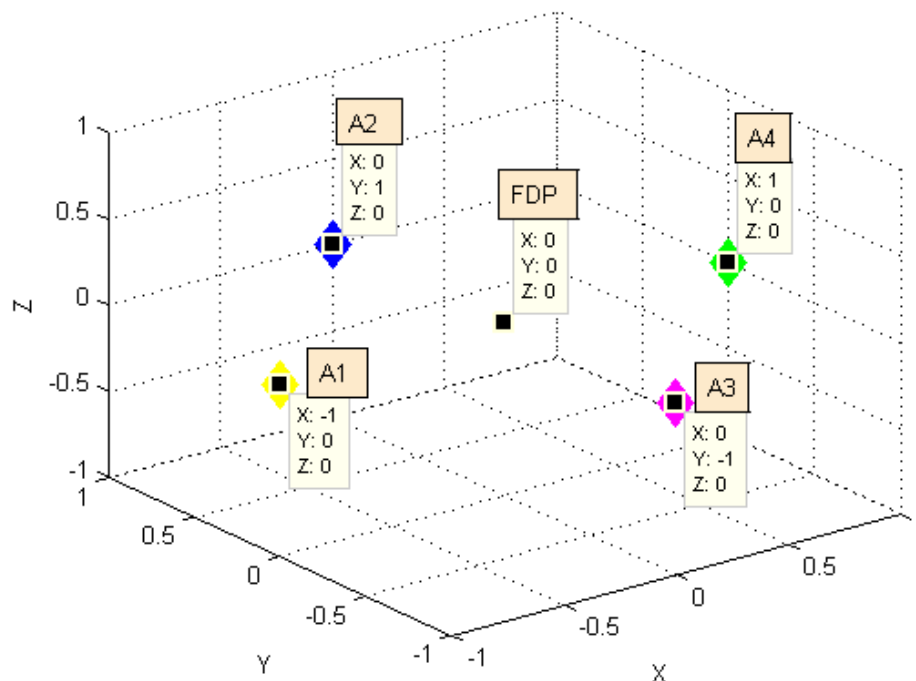


Figura 69. Simulación de la disposición de las antenas y de la fuente. Fuente propia.

El ensayo comienza aumentando la tensión hasta que en el osciloscopio empiecen a aparecer señales tal y como se aprecia en la figura 70. En concreto, se visualizan DPs cuando la tensión supera los 8000 V.

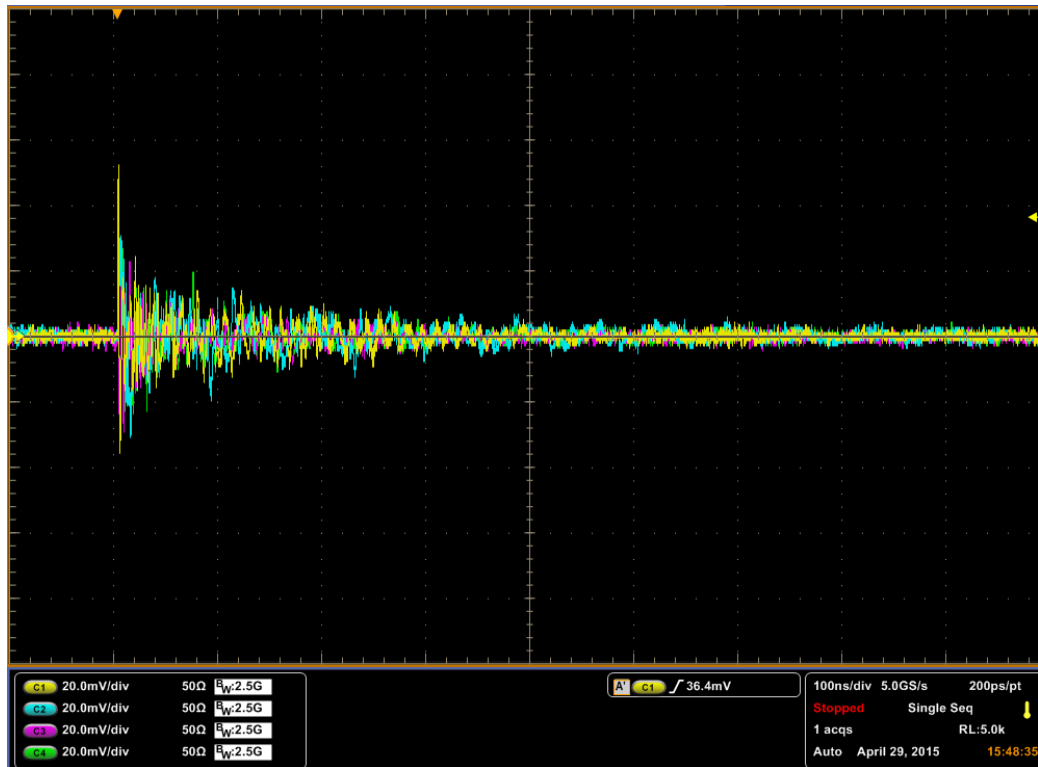


Figura 70. Señales registradas en el osciloscopio 100ns. Fuente propia.

Como análisis de la figura 70, para una frecuencia de muestreo de  $5 \text{ GS/s}$  y un valor de cada división de  $100 \text{ ns}$ , se obtiene que el número total de muestras registradas tiene un valor de  $N=5000$ . Conociendo  $N$  y la frecuencia de muestreo  $f_s$ , resulta inmediato el cálculo del tiempo de ventana como  $T_w = \frac{1}{f_s} \cdot N = 1 \mu\text{s}$ .

Tras capturar varias DPs registradas por las antenas, se distinguen dos casos diferentes:

- Por un lado, en la figura 71 se aprecia que las cuatro señales recibidas están en fase. Por tanto, esto implica que la descarga parcial ha sido registrada a la vez por los cuatro receptores siendo los TDOAs nulos. Para este caso, se localizaría la fuente de DPs en su ubicación real (0,0) sin haber cometido ningún error de localización.

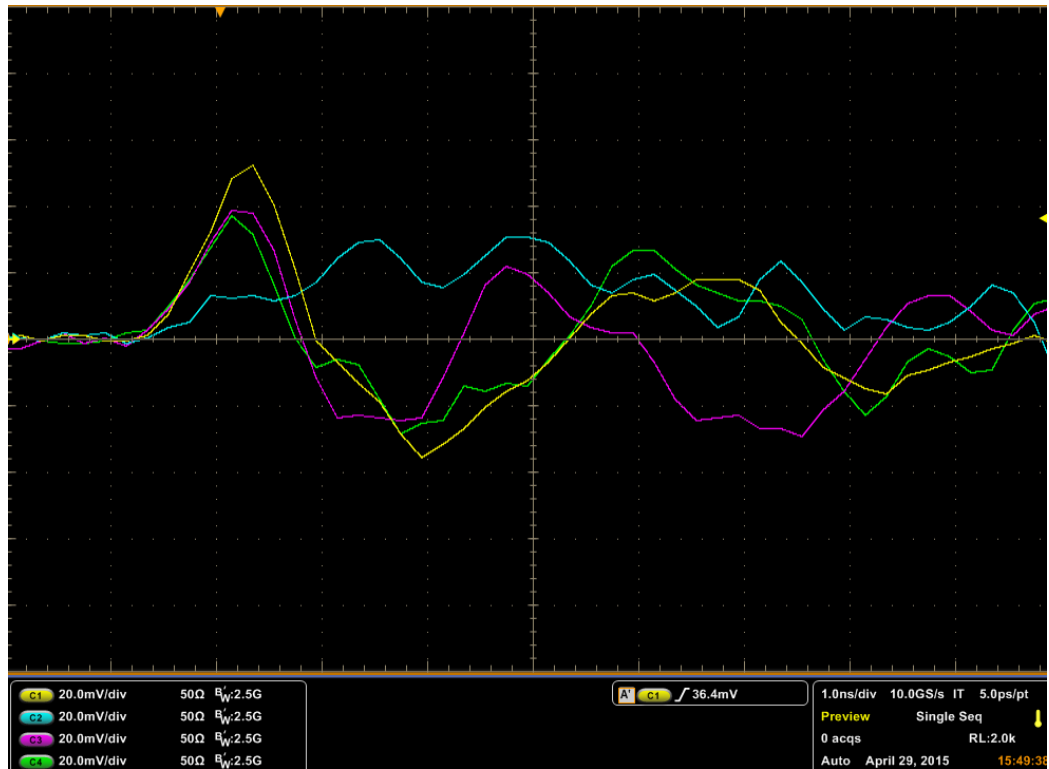


Figura 71. Señales de las cuatro antenas en fase 1ns. Fuente propia.

-Por otro lado, en la figura 72 las señales sí están desfasadas y para la localización de la fuente se tienen que medir los cuatro TDOAs. Se obvia la multipropagación de las señales, centrándose sólo en el estudio del primer impulso registrado para cada una de ellas.

En concreto, la frecuencia de muestreo ha variado a  $10 \text{ GS/s}$  y ahora cada división de la figura equivale a  $1 \text{ ns}$  de tiempo. Es necesario obtener los TDOAs de las cuatro antenas para poder aplicar el algoritmo PSO. Para conocerlos, basta con comparar los instantes en los que ha comenzado el registro de la DP para los diferentes pares de antenas. Para las señales de la figura 72 los TDOAs calculados son:  $t_{12} = -0,2 \text{ ns}$ ,  $t_{13} = 0,3 \text{ ns}$ ,  $t_{14} = 0,1 \text{ ns}$ ,  $t_{23} = 0,4 \text{ ns}$ ,  $t_{24} = 0,3 \text{ ns}$  y  $t_{34} = -0,2 \text{ ns}$ .

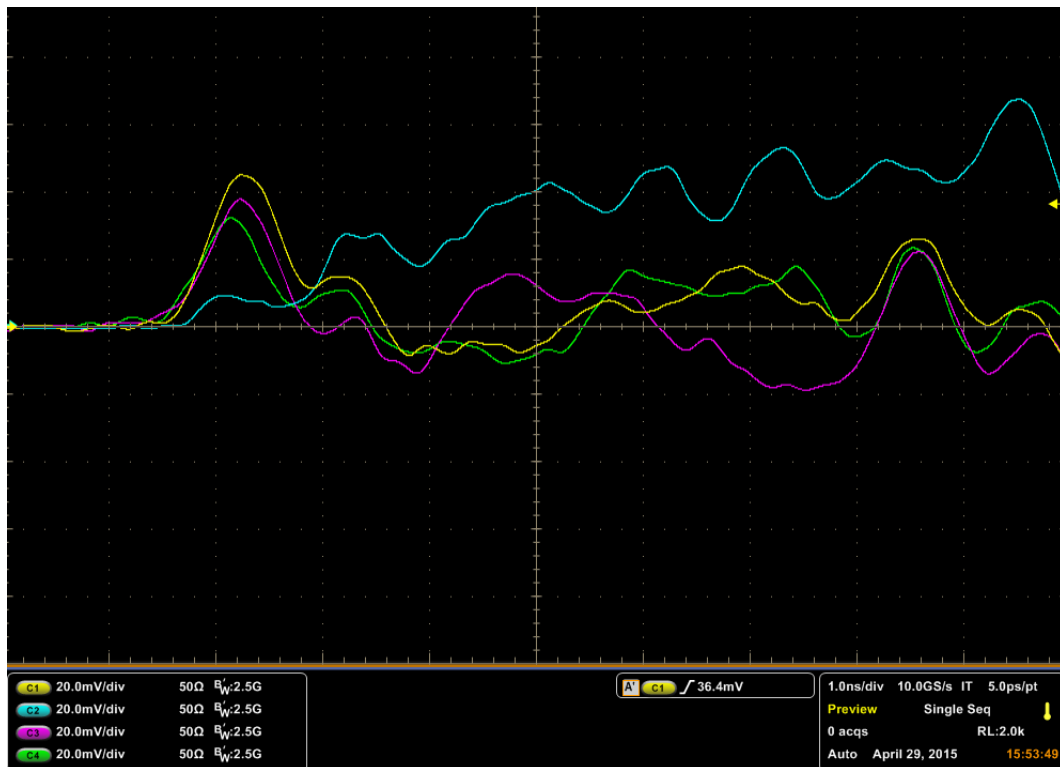


Figura 72. Señales desfasadas de las cuatro antenas 1 ns. Fuente propia.

Cabe destacar que para ambos casos, la señal azul registrada por la antena 2 es muy irregular y mala debido a la colocación de esta antena en el laboratorio. Su situación no es adecuada por situarse detrás del taburete sobre el que está colocado el transformador, hecho que implica no recibir directamente la descarga parcial.

Una vez obtenidos los TDOAs reales de las señales, se modifica el código 7 añadiendo una cuarta antena. El hecho de añadir una cuarta antena conlleva la modificación de la función objetivo porque aparecen nuevos pares de antenas y, con ellos, más TDOAs. También, se cambian las posiciones de las antenas por las indicadas en la figura 69, se elimina la posición de la fuente y se introducen como datos los seis TDOAs reales calculados. Como se explicó en el capítulo 7, también es necesario sustituir en el bucle `while` la condición de `temp` mayor a cero por un valor próximo a cero. Empleando TDOAs reales nunca se llega a anular la función objetivo y el algoritmo mantiene los cálculos durante un número infinito de iteraciones sin obtener la solución.

En primer lugar, se ha implementado un nuevo código 11 modificando todos los aspectos señalados en el párrafo anterior del código 7 pero los resultados de la posición de la fuente no han sido los esperados. Los problemas aparecían al variar los valores de

factores como el de inercia. Para ciertos valores, el algoritmo funcionaba sin problemas pero para otros valores, no disminuía el valor de la función objetivo para las mejores partículas del enjambre. Esto implica que no paraban de sucederse las iteraciones mientras que varias partículas del enjambre se encontraban realmente cerca de la posición de la fuente.

Ante esta situación, se volvió a modificar el código anterior teniendo en cuenta la escasa altura a la que se encuentran las antenas del suelo, unos 15 centímetros. Por lo tanto, se añade la componente  $z$  en el cálculo de la velocidad y de la posición de cada uno de los miembros del enjambre. Este nuevo código se corresponde con el código 12 del anexo 1. Con este código se consigue poder variar los factores de inercia y de corrección en más ocasiones que con el código 11. Como resultado, se obtiene la siguiente posición de la fuente:  $x_s = 0,094$  m y  $y_s = -0,4096$  m.

La solución se aproxima a las coordenadas reales de la fuente en el laboratorio (0,0) pero no es exacta por errores inevitables que tienen lugar en la toma de medidas. Estos errores están relacionados con factores como la medida poco precisa de TDOAs o la colocación de las antenas durante el ensayo. En particular, se aprecia que la coordenada  $x$  se aproxima más a la solución que la coordenada  $y$ ; puesto que sólo se desvía en 9 centímetros.

### 8.3 Dispersión en la localización de la fuente de DPs

En este último ensayo, se varía la posición de la fuente hasta en cuatro ocasiones calculando de nuevo para cada una de ellas los TDOAs de las señales. En este apartado, el cálculo de los TDOAs se ha llevado a cabo mediante el método de la energía con pendiente negativa. El objetivo es comparar la dispersión obtenida en la localización de la fuente en cada una de las cuatro situaciones diferentes. Las cuatro posiciones diferentes de la fuente se identifican como: centro, diagonal 1, diagonal 2 y diagonal 3, todas ellas se pueden apreciar en la figura 73.

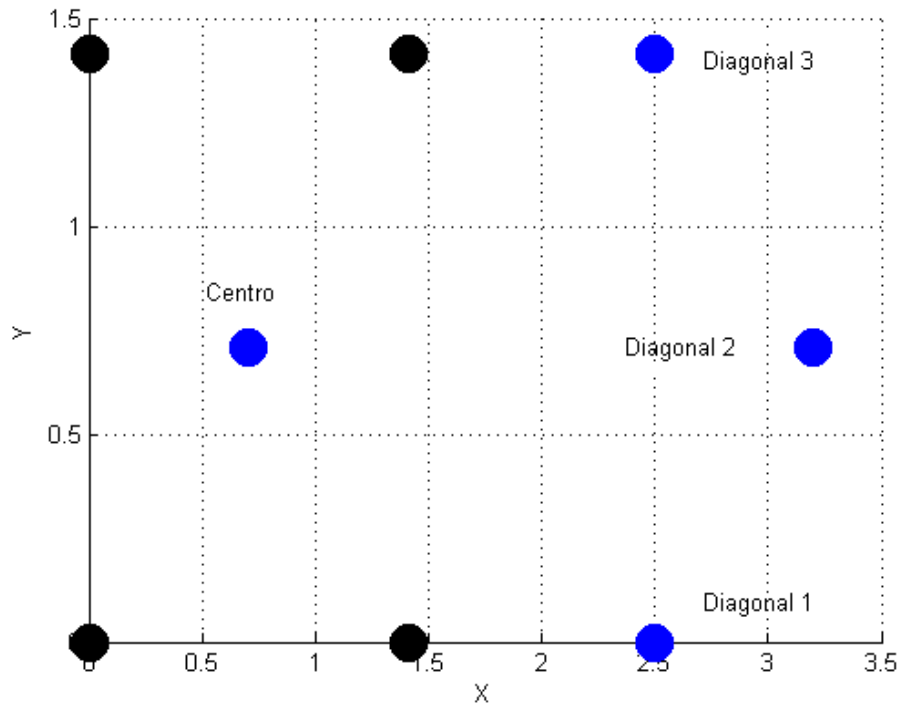


Figura 73. Esquema de los casos estudiados. Fuente propia.

En concreto, en el caso denominado centro las antenas se encuentran rodeando a la fuente igual que en el ensayo anterior. Por el contrario, para el resto de casos las antenas no rodean a la fuente. Se puede apreciar en la figura 74 el caso de la fuente en la diagonal 1 montado en el laboratorio.

Para llevar a cabo comparaciones resulta imprescindible, a la hora de realizar los diferentes casos, intentar que la tensión sea la misma. Para el caso en el que la fuente se sitúa en el centro las medidas se toman a una tensión de 8900 V, para la diagonal 1 a 8846 V, para la diagonal 2 a 8900 V y para la diagonal 3 a 8877 V. Antes de comenzar, se ha apartado el taburete por distorsionar la señal recibida por la antena 2.

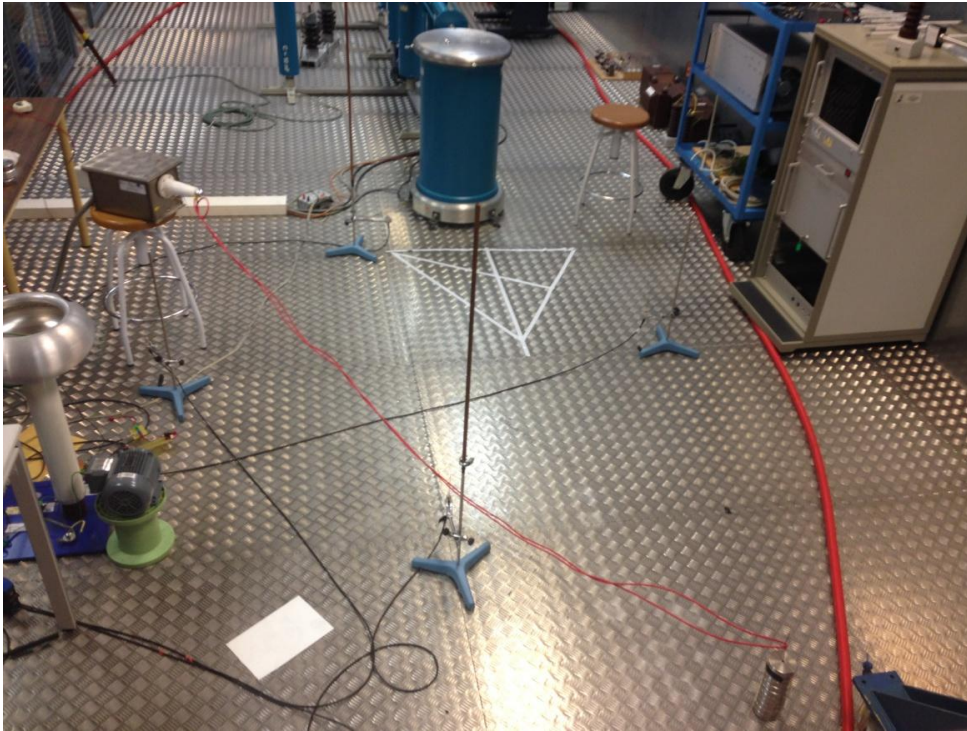


Figura 74. Ensayo con la fuente en la diagonal 1. Fuente propia.

Para cada uno de los diferentes casos, se ha trabajado con 50 capturas de señales con el fin de obtener un conjunto de soluciones del cual poder analizar su dispersión. Los puntos más alejados de la solución de la fuente en cada uno de los casos, han sido descartados. El conjunto de soluciones obtenidas de todos los casos, se muestran en las figuras 75, 76, 77 y 78.

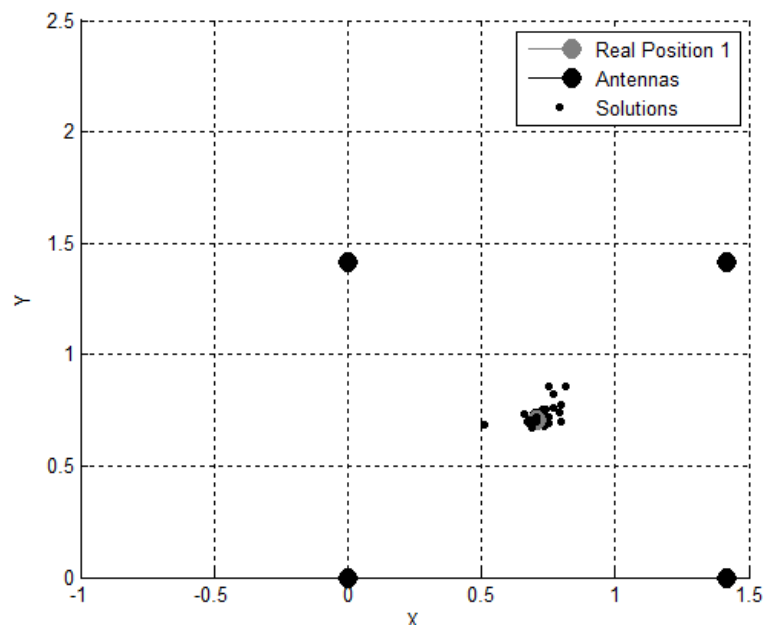


Figura 75. Antenas rodeando a la fuente de DPs (centro). Fuente propia.



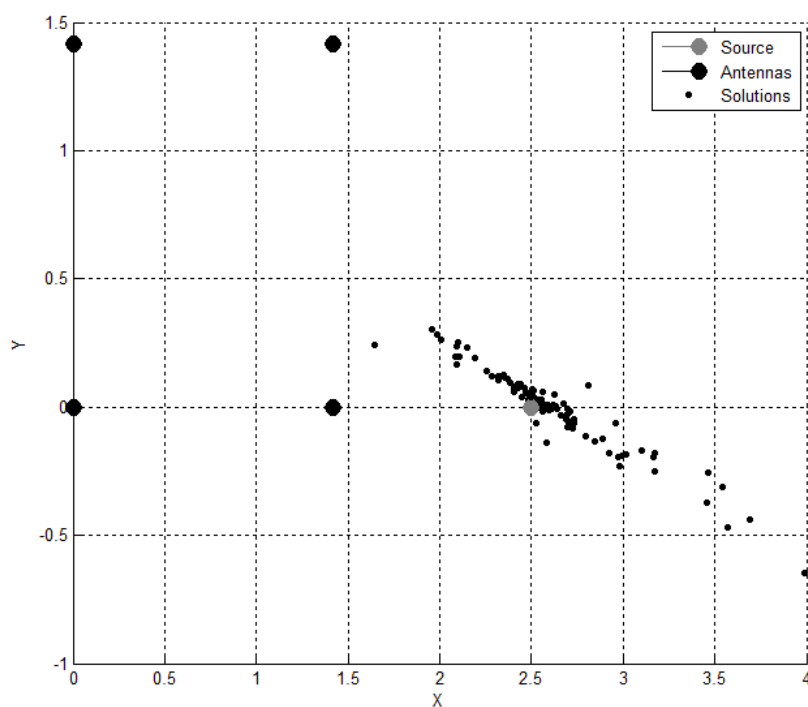


Figura 76. Fuente situada en la diagonal 1. Fuente propia.

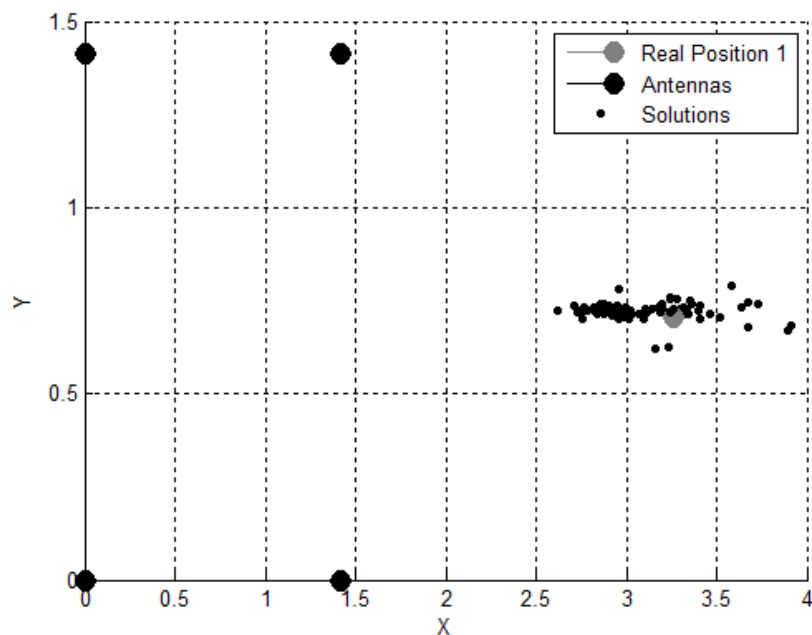


Figura 77. Fuente situada en la diagonal 2. Fuente propia.

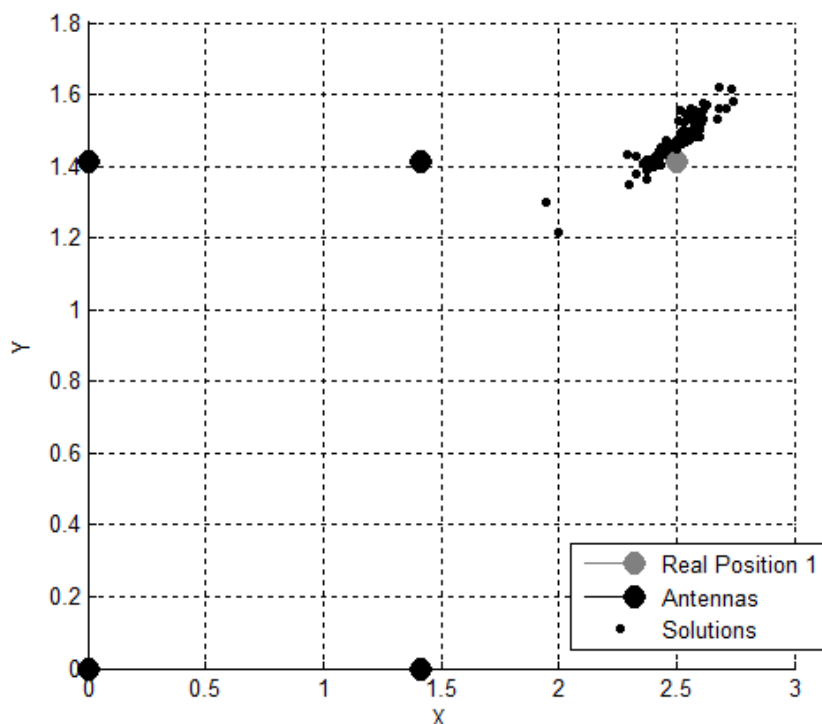


Figura 78. Fuente situada en la diagonal 3. Fuente propia.

En la figura 75, las antenas se encuentran rodeando a la fuente y la nube de puntos formada por las soluciones calculadas con PSO, se encuentra muy próxima a la ubicación real de la fuente. Por lo tanto, la localización con esta distribución es muy buena. Esto se debe a la posición que presentan las antenas respecto a la fuente, tal y como se estudió en el capítulo 3, cuando las antenas rodean a la fuente existe un mayor margen de error a la hora de calcular los TDOAs. Este mayor margen de error hace referencia a que, ante estas condiciones, el error de cálculo de los TDOAs presenta menor sensibilidad. Hecho que ayudar a poder localizar la fuente dentro de los errores de posición acotados. Los resultados obtenidos son muy buenos y de este modo, se ha confirmado experimentalmente la conclusión que mediante códigos de Matlab se había alcanzado comparando los valores almacenados en la matriz  $C$ . Únicamente se ha descartado una solución de las 50 calculadas, por estar muy alejada de la posición real de la fuente. El resto de soluciones presentan errores únicamente de unos centímetros.

En el caso de la diagonal 1, mostrado en la figura 76, la fuente está situada fuera de la distribución de antenas y alineada con dos de ellas. En esta ocasión, las soluciones presentan una gran dispersión y algunas de ellas, incluso están alejadas hasta 1 metro de la posición real de la fuente (2,5, 0). La localización de la fuente ha empeorado considerablemente respecto al caso anterior.

Respecto al caso de la diagonal 2 representado en la figura 77, la fuente no se encuentra alineada con ninguna antena y su posición también es exterior a la distribución. A pesar de que la nube de puntos obtenida para esta ocasión también

presenta cierta dispersión, las soluciones son mejores comparadas con las calculadas para el caso de la diagonal 1. Esto implica que la localización empeora cuando las antenas no rodean a la fuente de DPs y, además, la fuente se encuentra alineada con antenas.

La posición de la fuente en la diagonal 3, caso mostrado en la figura 78, se corresponde con la posición opuesta de la fuente de la diagonal 1. Por un lado, comparando los resultados calculados para esta distribución con los de la diagonal 2, se aprecia que ninguna de las soluciones se aproxima tanto a la posición real de la fuente como ocurre en el caso anterior. Por otro lado, los puntos que forman el conjunto de soluciones presentan una menor dispersión que los registrados para su diagonal opuesta.

## Conclusiones

En este proyecto se ha llevado a cabo la localización de fuentes de descargas parciales mediante el algoritmo de Optimización por enjambre de partículas o PSO. Debido a que el algoritmo necesita como datos de partida los TDOAs de las señales adquiridas por las antenas, a lo largo de este trabajo se analiza en profundidad la medida de los TDOAs.

Respecto al análisis de la influencia de la posición que presenten las antenas respecto a la fuente, se ha confirmado tanto mediante simulaciones como en el último ensayo llevado a cabo en el laboratorio, que la mejor localización se consigue para una posición concreta del conjunto. Esta posición consiste en que las antenas se encuentren rodeando a la fuente de DP. Hecho que confirman las gráficas obtenidas en las simulaciones, las cuales registraban los valores más elevados de las máximas desviaciones de TDOAs para esta situación. También con las pruebas experimentales, se confirma que es necesario que las antenas rodeen a la fuente para poder localizarla con mayor precisión y no obtener como solución una nube dispersa de puntos bastante alejados de la solución real.

Analizando las máximas desviaciones de TDOAs obtenidas tanto para la distribución cuadrada como triangular, se afirma que es preferible emplear la distribución cuadrada de antenas para llevar a cabo la localización de fuentes de descargas parciales. Esto se debe a que, a pesar de que la distribución triangular presenta un margen un poco mayor que la distribución cuadrada a la hora de cometer errores en el cálculo de TDOAs, en la distribución cuadrada se identifican cuatro zonas simétricas correspondientes a los máximos dTDOAs frente a la única zona que se identifica en la distribución triangular. De este modo, el hecho de emplear esta configuración, aumenta las posibilidades de que la fuente se encuentre en una de estas cuatro zonas más favorables a la hora de realizar las medidas. Además, el máximo identificado para la distribución triangular coincide justo con una de las antenas que forman la distribución. Por lo tanto, se trata de un resultado teórico válido pero que no se le puede sacar provecho en la práctica.

En las diferentes distribuciones analizadas en el laboratorio también se soluciona la problemática de la que se partía en este trabajo sobre la diferencia de dispersión en las soluciones obtenidas cometiendo errores parecidos en la medida de TDOAs. Se ha demostrado que se registra una mayor dispersión en la nube de soluciones calculadas

cuando la fuente no está rodeada por las antenas y se encuentra alineada con otras antenas. Para estos casos, la localización es muy poco precisa porque puede obtenerse como solución la fuente desplazada varios metros de la posición real. Como consecuencia, se considera esta posición de la fuente respecto a las antenas como la peor entre todas las estudiadas para poder llevar a cabo la localización de la misma.

El método PSO se ha empleado tanto con TDOAs teóricos como reales. Cuando se han realizado las simulaciones usando TDOAs teóricos, la localización de la fuente ha sido excelente. También se ha reducido el número de iteraciones en las que se alcanza la solución, evaluando los diferentes factores incluidos en PSO. Al trabajar con TDOAs reales, en algunas ocasiones el algoritmo presentaba problemas para converger. Para solucionarlo, se ha incluido la componente  $z$  en los cálculos correspondientes a todos los miembros del enjambre. Esto ha mejorado la convergencia para un mayor rango de valores de los factores incluidos en PSO. Esta localización empleando TDOAs reales, presenta errores de hasta 40 centímetros en la dirección y de la posición de la fuente. Estos resultados están condicionados a la medida de los TDOAs de las señales registradas en el osciloscopio. En definitiva, para obtener una localización más precisa se deben calcular los TDOAs mediante otras técnicas que reduzcan los errores lo máximo posible. También, es fundamental emplear el inicio de la DP para llevar a cabo la localización, obviando la multipropagación de la señal.

## Trabajos futuros

Los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo pueden usarse como punto de partida para continuar con la investigación de los siguientes puntos:

1. Implementar nuevos métodos para calcular TDOAs con mayor precisión que la disponible hasta el momento.
2. Desarrollar nuevos algoritmos de localización más tolerantes con los errores cometidos en el cálculo o medida de los TDOAs.
3. Aumentar el número de antenas empleadas en la distribución a 5 para estudiar los resultados obtenidos en la localización de la fuente de DPs aplicando el método PSO.
4. Seguir avanzando en la aplicación del algoritmo de optimización PSO en los diferentes campos de la ciencia.

## Anexo 1

### Código 1 (capítulo 2)

```
clear all
close all
clc

% Posición de las antenas de la distribución cuadrada A1, A2, A3 y A4
x1 = 0; y1 = 0; z1 = .3;
x2 = 0; y2 = 1; z2 = .3;
x3 = 1; y3 = 1; z3 = .3;
x4 =1; y4 =0 ; z4 = .3;

% Posición de la FDP desplazándose en la dirección y

kk=0;

for yf0=-3:0.1:3

    kk=kk+1;

    xf0 = 2.4;
    zf0 =0.3;

    figure(1)
    hold on
    axis([-0.5 3.5 -0.5 3.5 -0.5 3.5])
    view(30,30)

    plot3(xf0,yf0,zf0,'xr')
    plot3(x1,y1,z1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
    plot3(x2,y2,z2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
    plot3(x3,y3,z3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
    plot3(x4,y4,z4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')
    xlabel('X')
    ylabel('Y')
    zlabel('Z')
    %Cálculo de distancias entre las antenas y la fuente central
    d1 = norm([xf0-x1 yf0-y1 zf0-z1]);
    d2 = norm([xf0-x2 yf0-y2 zf0-z2]);
    d3 = norm([xf0-x3 yf0-y3 zf0-z3]);
    d4 = norm([xf0-x4 yf0-y4 zf0-z4]);

    %Cálculo del TDOA respecto a la fuente central
```

```
TDOA0=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4];
TDOA0
%Construcción del cubo de posibles fuentes de DP. Las variables er y
paso definen las dimensiones del cubo.
er=.1;
paso=.1;
ct = 0;
for i=-er:paso:er
    for j=-er:paso:er
        for k=-er:paso:er
            ct=ct+1;
            xf = xf0+i;
            yf = yf0+j;
            zf = zf0+k;
            plot3(xf,yf,zf,'xm')
            d1 = norm([xf-x1 yf-y1 zf-z1]);
            d2 = norm([xf-x2 yf-y2 zf-z2]);
            d3 = norm([xf-x3 yf-y3 zf-z3]);
            d4 = norm([xf-x4 yf-y4 zf-z4]);
            %Cálculo de la matriz dTDOA fila a fila.
            dTDOA(ct,:)= [d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4]-TDOA0;
        end
    end
end

%Matriz dTDOA completa.
dTDOA
%Valor máximo absoluto de toda la matriz dTDOA
max(max(abs(dTDOA)))

%Creación fila a fila de la matriz C indicando a qué fila de la
matriz dTDOA pertenecen estos valores registrados en C.
[C(kk,:),I]=max(abs(dTDOA))

end

%Matriz C completa
C(kk,:)=max(abs(dTDOA));

%Gráficas para cada par de antenas
y=-3:0.1:3;
for a=1:1:6
    figure
    plot(y,C(:,a))
    xlabel('Y');
    ylabel('C');
end
```

## Código 2 (capítulo 3)

```
clear all
close all
clc
%Distribución cuadrada de antenas A1, A2, A3 y A4
x1 = 0; y1 = 0; z1 = .3;
```



```
x2 = 0; y2 = 1; z2 = .3;
x3 = 1; y3 = 1; z3 = .3;
x4 =1; y4 =0 ; z4 = .3;

% Posición de la FDP central desplazándose en la dirección y

kk=0;

for yf0=-3:0.1:3

    kk=kk+1;
    %Las FDP se mueven por el exterior de la distribución cuadrada de
    %antenas, el cubo está situado en 2.4 en la dirección x.
    xf0 = 2.4; zf0 =0.3;

    d1 = norm([xf0-x1 yf0-y1 zf0-z1]);
    d2 = norm([xf0-x2 yf0-y2 zf0-z2]);
    d3 = norm([xf0-x3 yf0-y3 zf0-z3]);
    d4 = norm([xf0-x4 yf0-y4 zf0-z4]);
    %Cálculo del TDOA respecto a la fuente central
    TDOA0=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4];
    %Construcción del cubo de posibles fuentes de DP
    er=.1;
    paso=.1;
    ct = 0;
    for i=-er:paso:er
        for j=-er:paso:er
            for k=-er:paso:er
                ct=ct+1;
                xf = xf0+i;
                yf = yf0+j;
                zf = zf0+k;
                d1 = norm([xf-x1 yf-y1 zf-z1]);
                d2 = norm([xf-x2 yf-y2 zf-z2]);
                d3 = norm([xf-x3 yf-y3 zf-z3]);
                d4 = norm([xf-x4 yf-y4 zf-z4]);

                %Cálculo de la matriz dTDOA fila a fila.
                dTDOA(ct,:)= [d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4]-TDOA0;
            end
        end
    end

    %Matriz dTDOA completa.
    dTDOA
    %Valor máximo absoluto de toda la matriz dTDOA
    max(max(abs(dTDOA)))

    %Creación fila a fila de la matriz C indicando a qué fila de la
    %matriz dTDOA pertenecen estos valores registrados en C.
    [C(kk,:), I]=max(abs(dTDOA))

end
%Matriz C completa
C(kk,:)=max(abs(dTDOA))

kkk=0;
```

```
for yf0=-3:0.1:3

    kkk=kkk+1;
    %Las FDP atraviesan la distribución cuadrada de antenas, el cubo está
    %situado en 0.5 en la dirección x.
    xf0 = 0.5; zf0 =0.3;

    d1 = norm([xf0-x1 yf0-y1 zf0-z1]);
    d2 = norm([xf0-x2 yf0-y2 zf0-z2]);
    d3 = norm([xf0-x3 yf0-y3 zf0-z3]);
    d4 = norm([xf0-x4 yf0-y4 zf0-z4]);

    TDOA0=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4];
    %Construcción del cubo de posibles fuentes de DP
    er=.1;
    paso=.1;
    ct = 0;
    for i=-er:paso:er
        for j=-er:paso:er
            for k=-er:paso:er
                ct=ct+1;
                xf = xf0+i;
                yf = yf0+j;
                zf = zf0+k;
                d1 = norm([xf-x1 yf-y1 zf-z1]);
                d2 = norm([xf-x2 yf-y2 zf-z2]);
                d3 = norm([xf-x3 yf-y3 zf-z3]);
                d4 = norm([xf-x4 yf-y4 zf-z4]);
                %Cálculo de la matriz dTDOA fila a fila.
                dTDOA(ct,:)= [d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4]-TDOA0;
            end
        end
    end

    %Matriz dTDOA completa.
    dTDOA;
    max(max(abs(dTDOA)));
    %Creación de una nueva matriz C1 para este nuevo caso en el que se
    %atraviesa la distribución de las antenas.
    [C1(kkk,:), I]=max(abs(dTDOA));
end
%Matriz C1 completa
C1(kkk,:)=max(abs(dTDOA));
y=-3:0.1:3;
%Gráficas para cada par de antenas
for a=1:1:6
    figure
    if a==1
        %Datos de la columna correspondiente al par 1-2 de antenas de C
        plot(y,C(:,a))
        xlabel('Y');
        ylabel('C');
        title ('Par de antenas 1-2');
        hold on
        %Datos de la columna correspondiente al par 1-2 de antenas de C1
        plot(y,C1(:,a), 'r')
    end
end
```

```
if a==2
    %Datos de la columna correspondiente al par 1-3 de antenas de C
    plot(y,C(:,a))
    xlabel('Y');
    ylabel('C');
    title ('Par de antenas 1-3');
    hold on
    %Datos de la columna correspondiente al par 1-3 de antenas de C1
    plot(y,C1(:,a),'r')
end
if a==3
    %Datos de la columna correspondiente al par 1-4 de antenas de C
    plot(y,C(:,a))
    xlabel('Y');
    ylabel('C');
    title ('Par de antenas 1-4');
    hold on
    %Datos de la columna correspondiente al par 1-4 de antenas de C1
    plot(y,C1(:,a),'r')
end
if a==4
    %Datos de la columna correspondiente al par 2-3 de antenas de C
    plot(y,C(:,a))
    xlabel('Y');
    ylabel('C');
    title ('Par de antenas 2-3');
    hold on
    %Datos de la columna correspondiente al par 2-3 de antenas de C1
    plot(y,C1(:,a),'r')
end
if a==5
    %Datos de la columna correspondiente al par 2-4 de antenas de C
    plot(y,C(:,a))
    xlabel('Y');
    ylabel('C');
    title ('Par de antenas 2-4');
    hold on
    %Datos de la columna correspondiente al par 2-4 de antenas de C1
    plot(y,C1(:,a),'r')
end
if a==6
    %Datos de la columna correspondiente al par 3-4 de antenas de C
    plot(y,C(:,a))
    xlabel('Y');
    ylabel('C');
    title ('Par de antenas 3-4');
    hold on
    %Datos de la columna correspondiente al par 3-4 de antenas de C1
    plot(y,C1(:,a),'r')
end

end
```

### Código 3 (capítulo 3)

```
% Cálculo de la desviación de los TDOAs

clear all
close all
clc

% Distribución triangular de antenas A1, A2, A3 y A4
x1 = 0; y1 = 0; z1 = .3;
x2 = 0; y2 = 1; z2 = .3;
x3 = sqrt(3)/2; y3 = .5; z3 = .3;
x4 = sqrt(3)/6; y4 = .5; z4 = .3;

% Posición central de la fuente

kk=0;

for yf0=-3:0.1:3

    kk=kk+1;

    xf0 = 2.4; zf0 =0.3;

    d1 = norm([xf0-x1 yf0-y1 zf0-z1]);
    d2 = norm([xf0-x2 yf0-y2 zf0-z2]);
    d3 = norm([xf0-x3 yf0-y3 zf0-z3]);
    d4 = norm([xf0-x4 yf0-y4 zf0-z4]);

    TDOA0=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4];
    er=.1;
    paso=.1;
    ct = 0;
    for i=-er:paso:er
        for j=-er:paso:er
            for k=-er:paso:er
                ct=ct+1;
                xf = xf0+i;
                yf = yf0+j;
                zf = zf0+k;

                % plot3(xf,yf,zf,'xm')
                d1 = norm([xf-x1 yf-y1 zf-z1]);
                d2 = norm([xf-x2 yf-y2 zf-z2]);
                d3 = norm([xf-x3 yf-y3 zf-z3]);
                d4 = norm([xf-x4 yf-y4 zf-z4]);
                dTDOA(ct,:)= [d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4]-TDOA0;
            end
        end
    end

    dTDOA;
    max(max(abs(dTDOA)));

    [C(kk,:),I]=max(abs(dTDOA));
```

```

end

C(kk,:) = max(abs(dTDOA))

kkk=0;

for yf0=-3:0.1:3

    kkk=kkk+1;

    xf0 = sqrt(3)/4; zf0 = 0.3;

    d1 = norm([xf0-x1 yf0-y1 zf0-z1]);
    d2 = norm([xf0-x2 yf0-y2 zf0-z2]);
    d3 = norm([xf0-x3 yf0-y3 zf0-z3]);
    d4 = norm([xf0-x4 yf0-y4 zf0-z4]);

    TDOA0=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4];
    er=.1;
    paso=.1;
    ct = 0;
    for i=-er:paso:er
        for j=-er:paso:er
            for k=-er:paso:er
                ct=ct+1;
                xf = xf0+i;
                yf = yf0+j;
                zf = zf0+k;
                d1 = norm([xf-x1 yf-y1 zf-z1]);
                d2 = norm([xf-x2 yf-y2 zf-z2]);
                d3 = norm([xf-x3 yf-y3 zf-z3]);
                d4 = norm([xf-x4 yf-y4 zf-z4]);
                dTDOA(ct,:)=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4]-TDOA0;
            end
        end
    end

    dTDOA
    max(max(abs(dTDOA)))
    [C1(kkk,:), I]=max(abs(dTDOA));
end

C1(kkk,:)=max(abs(dTDOA))
y=-3:0.1:3;
for a=1:1:6
    figure
    if a==1
        plot(y,C(:,a))
        xlabel('Eje Y');
        ylabel('C');
        title('Par de antenas 1-2');
        hold on
        plot(y,C1(:,a), 'r')
    end
    if a==2
        plot(y,C(:,a))

```

```
xlabel('Eje Y');
ylabel('C');
title ('Par de antenas 1-3');
hold on
plot(y,C1(:,a),'r')
end
if a==3
plot(y,C(:,a))
xlabel('Eje Y');
ylabel('C');
title ('Par de antenas 1-4');
hold on
plot(y,C1(:,a),'r')
end
if a==4
plot(y,C(:,a))
xlabel('Eje Y');
ylabel('C');
title ('Par de antenas 2-3');
hold on
plot(y,C1(:,a),'r')
end
if a==5
plot(y,C(:,a))
xlabel('Eje Y');
ylabel('C');
title ('Par de antenas 2-4');
hold on
plot(y,C1(:,a),'r')
end
if a==6
plot(y,C(:,a))
xlabel('Eje Y');
ylabel('C');
title ('Par de antenas 3-4');
hold on
plot(y,C1(:,a),'r')
end
end
end
```

## Código 4 (capítulo 4)

```
clear all
close all
clc

% Distribución cuadrada de antenas A1,A2,A3 y A4
x1 = 0; y1 = 0; z1 = .3;
x2 = 0; y2 = 1; z2 = .3;
x3 = 1; y3 = 1; z3 = .3;
x4 =1; y4 =0 ; z4 = .3;

kk=0;
kkk=0;

% Superficie recorrida por la fuente central
for yf0=0:0.1:1
    kkk=kkk+1;
```

```

for xf0=0:0.1:1
    kk=kk+1;
    xf0
    yf0

    zf0 =0.3;

figure(1)
XLABEL('X');
YLABEL('Y');
hold on
axis([-0.5 3.5 -0.5 3.5 -0.5 3.5])
view(30,30)

plot3(xf0,yf0,zf0,'xm')
plot3(x1,y1,z1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot3(x2,y2,z2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot3(x3,y3,z3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot3(x4,y4,z4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')

%Distancias calculadas entre las antenas y la fuente central
d1 = norm([xf0-x1 yf0-y1 zf0-z1]);
d2 = norm([xf0-x2 yf0-y2 zf0-z2]);
d3 = norm([xf0-x3 yf0-y3 zf0-z3]);
d4 = norm([xf0-x4 yf0-y4 zf0-z4]);

TDOA0=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4];
%Dimensiones del cubo

er=.1;
paso=.1;
ct = 0;
%Construcción del cubo de posibles fuentes de DP
for i=-er:paso:er
    for j=-er:paso:er
        for k=-er:paso:er
            ct=ct+1;
            xf = xf0+i;
            yf = yf0+j;
            zf = zf0+k;
            %
            plot3(xf,yf,zf,'xm')
            d1 = norm([xf-x1 yf-y1 zf-z1]);
            d2 = norm([xf-x2 yf-y2 zf-z2]);
            d3 = norm([xf-x3 yf-y3 zf-z3]);
            d4 = norm([xf-x4 yf-y4 zf-z4]);
            % Cálculo fila a fila de la matriz dTDOA
            dTDOA(ct,:)= [d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4]-TDOA0;
        end
    end
end

dTDOA;
max(max(abs(dTDOA))) ;

```

```
%Matriz C
[C(kk,:),I]=max(abs(dTDOA))
%Construcción de nuevas matrices una por cada par de antenas
datos12(kk,kkk)=C(kk,1);
datos13(kk,kkk)=C(kk,2);
datos14(kk,kkk)=C(kk,3);
datos23(kk,kkk)=C(kk,4);
datos24(kk,kkk)=C(kk,5);
datos34(kk,kkk)=C(kk,6);

    end
    kk=0;
end

x=0:0.1:1;
y=0:0.1:1;

[X,Y]=meshgrid(x,y);
figure(2)
surf(Y,X,datos12)
title('Par de antenas 1-2');

xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('C');

hold on
plot(x1,y1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot(x2,y2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot(x3,y3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot(x4,y4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')

figure(3)

surf(Y,X,datos13)
title('Par de antenas 1-3');
XLABEL('X');
YLABEL('Y');
ZLABEL('C');

hold on
plot(x1,y1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot(x2,y2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot(x3,y3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot(x4,y4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')

figure(4)
```



```
surf(Y,X,datos14)
title('Par de antenas 1-4');
XLABEL('X');
YLABEL('Y');
ZLABEL('C');

hold on
plot(x1,y1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot(x2,y2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot(x3,y3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot(x4,y4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')

figure(5)

surf(Y,X,datos23)

title('Par de antenas 2-3');
XLABEL('X');
YLABEL('Y');
ZLABEL('C');

hold on
plot(x1,y1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot(x2,y2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot(x3,y3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot(x4,y4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')

figure(6)

surf(Y,X,datos24)
title('Par de antenas 2-4');
XLABEL('X');
YLABEL('Y');
ZLABEL('C');

hold on
plot(x1,y1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot(x2,y2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot(x3,y3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot(x4,y4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')
```

```
figure(7)

surf(Y,X,datos34)
title('Par de antenas 3-4');
XLABEL('X');
YLABEL('Y');
ZLABEL('C');

hold on
plot(x1,y1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot(x2,y2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot(x3,y3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot(x4,y4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')

figure
x=0:0.1:1;
y=0:0.1:1;
datostotal=datos12+datos13+datos14+datos23+datos24+datos34;
[X,Y]=meshgrid(x,y);

surf(Y,X,datostotal)
shading flat

xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('C');

hold on
plot(x1,y1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot(x2,y2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot(x3,y3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot(x4,y4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')
```

## Código 5 (capítulo 4)

```
clear all
close all
clc

% Distribución triangular de antenas A1,A2,A3 y A4
x1 = 0; y1 = 0; z1 = .3;
x2 = 0; y2 = 1; z2 = .3;
x3 = sqrt(3)/2; y3 = .5; z3 = .3;
x4 = sqrt(3)/6; y4 = .5; z4 = .3;
```

```

kk=0;
kkk=0;

% Superficie recorrida por la fuente central
for yf0=0:0.1:1
    kkk=kkk+1;
    for xf0=0:0.1:1
        kk=kk+1;
        xf0
        yf0

        zf0 =0.3;

figure(1)
XLABEL('X');
YLABEL('Y');
hold on
axis([-0.5 3.5 -0.5 3.5 -0.5 3.5])
view(30,30)

plot3(xf0,yf0,zf0,'xm')
plot3(x1,y1,z1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot3(x2,y2,z2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot3(x3,y3,z3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot3(x4,y4,z4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')

%Distancias calculadas entre las antenas y la fuente central
d1 = norm([xf0-x1 yf0-y1 zf0-z1]);
d2 = norm([xf0-x2 yf0-y2 zf0-z2]);
d3 = norm([xf0-x3 yf0-y3 zf0-z3]);
d4 = norm([xf0-x4 yf0-y4 zf0-z4]);

TDOA0=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4];
%Dimensiones del cubo

er=.1;
paso=.1;
ct = 0;
%Construcción del cubo de posibles fuentes de DP
for i=-er:paso:er
    for j=-er:paso:er
        for k=-er:paso:er
            ct=ct+1;
            xf = xf0+i;
            yf = yf0+j;
            zf = zf0+k;
%
            plot3(xf,yf,zf,'xm')
            d1 = norm([xf-x1 yf-y1 zf-z1]);
            d2 = norm([xf-x2 yf-y2 zf-z2]);
            d3 = norm([xf-x3 yf-y3 zf-z3]);
            d4 = norm([xf-x4 yf-y4 zf-z4]);
% Cálculo fila a fila de la matriz dTDOA
            dTDOA(ct,:)=[d1-d2 d1-d3 d1-d4 d2-d3 d2-d4 d3-d4]-TDOA0;
        end
    end
end

```

```
end
end

dTDOA;
max(max(abs(dTDOA))) ;

%Matriz C
[C(kk,:),I]=max(abs(dTDOA))
%Construcción de nuevas matrices una por cada par de antenas
datos12(kk, kkk)=C(kk,1);
datos13(kk, kkk)=C(kk,2);
datos14(kk, kkk)=C(kk,3);
datos23(kk, kkk)=C(kk,4);
datos24(kk, kkk)=C(kk,5);
datos34(kk, kkk)=C(kk,6);

end
kk=0;
end

x=0:0.1:1;
y=0:0.1:1;
datostotal=datos12+datos13+datos14+datos23+datos24+datos34;
[X,Y]=meshgrid(x,y);
figure(2)

surf(Y,X,datostotal)
shading flat

xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('C');

hold on
plot(x1,y1,'rd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r')
plot(x2,y2,'bd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','b','MarkerEdgeColor','b')
plot(x3,y3,'yd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','y','MarkerEdgeColor','y')
plot(x4,y4,'gd','MarkerSize',15,'MarkerFaceColor','g','MarkerEdgeColor','g')
```

## Código 6 (capítulo 5)

```
clc
%Vector para la señal obtenida por cada antena
N=1000;
A1=zeros(1,N);
A2=zeros(1,N);
A3=zeros(1,N);
%Tiempo de muestreo
Ts=0.1e-9;
%Tiempo de registro de la DP para la antena 1
t1=1e-8;
%TDOAs como dato
```

```
t12 =2.8886e-009;
t13 =8.2574e-009;
t23 =5.3688e-009;
%Índice de la muestra en la que se encuentra el pulso.
n1=indice(t1,Ts);
A1(1,n1)=1;
%Resto de tiempos para los que aparece un 1 de amplitud
t2=tiempos(t1,t12);
n2=indice(t2,Ts);
n2=fix(n2);
A2(1,n2)=1;
t3=tiempos(t1,t13);
n3=indice(t3,Ts);
n3=fix(n3);

A3(1,n3)=1;
%Dibujo la señal obtenida por las tres antenas
plot(A1,'g')
hold on
plot(A2,'b')
plot(A3,'r')
hold off

%Cálculo t12
r12=xcorr(A1,A2);
figure
plot(r12)
[val,ind]=max(xcorr(A1,A2))
n12=-N+ind
t12=Ts*n12

%Cálculo t23
r23=xcorr(A2,A3);
figure
plot(r23)
[val,ind]=max(xcorr(A2,A3))
n23=-N+ind
t23=Ts*n23

%Cálculo t13
r13=xcorr(A1,A3);
figure
plot(r13)
[val,ind]=max(xcorr(A1,A3))
n13=-N+ind
t13=Ts*n13

function [t] = tiempos(ta,tb)
% Detailed explanation goes here
t=ta-tb;
end

function [n] = indice(t,T)
% Detailed explanation goes here

n=t/T;
end
```

## Código 7(capítulo 6)

```
clear all
clc

inercia = 1;
factor_correccion =2;
tam_enjambre = 49;
c=3e8;
%Posición de la fuente S de DP y de las antenas A1, A2 y A3
S=[3 2];
A1=[5 5];
A2=[1 -2];
A3=[-3 3];
%Cálculo de las distancias entre S y las antenas
d1=norm(S-A1);
d2=norm(S-A2);
d3=norm(S-A3);
% Diferencias de tiempos de llegada de la DP entre antenas
t12=(d1-d2)/c;
t13=(d1-d3)/c;
t23=(d2-d3)/c;

%Inicialización de la posición de las partículas

indice = 1;
for i = 1 : 7
    for j = 1 : 7
        enjambre(indice, 1, 1) = i+2;
        enjambre(indice, 1, 2) = j+3;
        indice = indice + 1;
    end
end

%Mejor valor de la función objetivo hasta el momento
enjambre(:, 4, 1) = 1000;

%Inicialización de la velocidad
enjambre(:, 2, :) = 0;

temp=4;
k=0;
while (temp>0)
    k=k+1;
    %Cálculo de la nueva posición de la partícula y del valor de la
    función objetivo para la misma
    for i = 1 : tam_enjambre
        %Actualización de la posición (componente x)
        enjambre(i, 1, 1) = enjambre(i, 1, 1) + enjambre(i, 2, 1)/1.3;
        %Actualización de la posición (componente y)
        enjambre(i, 1, 2) = enjambre(i, 1, 2) + enjambre(i, 2, 2)/1.3;
        x = enjambre(i, 1, 1);
        y = enjambre(i, 1, 2);

        P=[x y];
```

```
d1=norm(A1-P);
d2=norm(A2-P);
d3=norm(A3-P);

%Función objetivo a minimizar
val=((t12*c)-(d1-d2))^2+((t13*c)-(d1-d3))^2+((t23*c)-(d2-
d3))^2;

%Si la nueva posición es mejor, se actualiza el valor de la
mejor
%posición x, la mejor posición y y el valor de la función
objetivo
if val < enjambre(i, 4, 1)
    enjambre(i, 3, 1) = enjambre(i, 1, 1);
    enjambre(i, 3, 2) = enjambre(i, 1, 2);
    enjambre(i, 4, 1) = val;
end
end

% Mejor posición global
[temp,pmejor] = min(enjambre(:, 4, 1));
enjambre
temp
k

%Actualización de la velocidad
for i = 1 : tam_enjambre
    %Velocidad (componente x)
    enjambre(i, 2, 1) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 1)
+factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1));
    %Velocidad (componente y)
    enjambre(i, 2, 2) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 2) +
factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2));
end

%Visualización del enjambre
clf
%Dibujo de cada movimiento

plot(enjambre(:, 1, 1),enjambre(:, 1, 2), 'x')
xlabel ('X');
ylabel ('Y');
axis([-2 10 -2 10]);
pause(.2)
end
```

## Código 8(capítulo 6)

```
%Número de muestras
n=100
```

```
%Onda captada por A1
A1=zeros(1,n);
%Registro de la DP para A1
A1(20)=1;
%Onda captada por A2
A2=zeros(1,n);
%Registro de la DP para A2
A2(35)=1;
%Onda captada por A3
A3=zeros(1,n);
%Registro de la DP para A3
A3(60)=1;
hold on
plot(A1,'m')
plot(A2,'c')
plot(A3,'r')
xlabel('Muestras')
ylabel('Amplitud')
```

## Código 9(capítulo 7)

```
clear all
clc
inercia = 0.5;
factor_correccion =1;
tam_enjambre = 49;
c=3e8;
%Posición de la fuente S de DP y de las antenas A1, A2 y A3
S=[3 2];
A1=[5 5];
A2=[1 -2];
A3=[-3 3];
%Cálculo de las distancias entre S y las antenas
d1=norm(S-A1);
d2=norm(S-A2);
d3=norm(S-A3);
% Diferencias de tiempos de llegada de la DP entre antenas
t12=(d1-d2)/c;
t13=(d1-d3)/c;
t23=(d2-d3)/c;

%Inicialización de la posición de las partículas

indice = 1;
for i = 1 : 7
    for j = 1 : 7
        enjambre(indice, 1, 1) = i+2;
        enjambre(indice, 1, 2) = j+3;
        indice = indice + 1;
    end
end

%Mejor valor de la función objetivo hasta el momento
enjambre(:, 4, 1) = 1000;

%Inicialización de la velocidad
enjambre(:, 2, :) = 0;
```



```
temp=4;
k=0;
while (temp>0)
    k=k+1;
    %Cálculo de la nueva posición de la partícula y del valor de la
    función objetivo para la misma
    for i = 1 : tam_enjambre
        %Actualización de la posición (componente x)
        enjambre(i, 1, 1) = enjambre(i, 1, 1) + enjambre(i, 2, 1)/1.3;
        %Actualización de la posición (componente y)
        enjambre(i, 1, 2) = enjambre(i, 1, 2) + enjambre(i, 2, 2)/1.3;
        x = enjambre(i, 1, 1);
        y = enjambre(i, 1, 2);

        P=[x y];

        d1=norm(A1-P);
        d2=norm(A2-P);
        d3=norm(A3-P);

        %Función objetivo a minimizar
        val=((t12*c)-(d1-d2))^2+((t13*c)-(d1-d3))^2+((t23*c)-(d2-
        d3))^2;

        %Si la nueva posición es mejor, se actualiza el valor de la
        mejor
        %posición x, la mejor posición y y el valor de la función
        objetivo
        if val < enjambre(i, 4, 1)
            enjambre(i, 3, 1) = enjambre(i, 1, 1);
            enjambre(i, 3, 2) = enjambre(i, 1, 2);
            enjambre(i, 4, 1) = val;
        end
    end

    % Mejor posición global
    [temp,pmejor] = min(enjambre(:, 4, 1));

    valorfinal(k)=temp;
    %Actualización de la velocidad
    for i = 1 : tam_enjambre
        %Velocidad (componente x)
        enjambre(i, 2, 1) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 1)
        +factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1)) +
        factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1));
        %Velocidad (componente y)
        enjambre(i, 2, 2) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 2) +
        factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2)) +
        factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2));
    end

    %Visualización del enjambre
    clf
    %Dibujo de cada movimiento
    plot(enjambre(:, 1, 1),enjambre(:, 1, 2), 'x')
```

```
axis([-2 10 -2 10]);
pause(.2)
end

figure
niter=1:1:k;
plot(niter,valorfinal);
xlabel('nº iteraciones');
ylabel('temp');
```

## Código 10(capítulo 7)

```
clear all
clc
inercia = 0.5;
factor_correccion =1;
tam_enjambre = 49;
c=3e8;
%Posición de la fuente S de DP y de las antenas A1, A2 y A3
S=[3 2];
A1=[5 5];
A2=[1 -2];
A3=[-3 3];
%Cálculo de las distancias entre S y las antenas
d1=norm(S-A1);
d2=norm(S-A2);
d3=norm(S-A3);
% Diferencias de tiempos de llegada de la DP entre antenas
t12=(d1-d2)/c;
t13=(d1-d3)/c;
t23=(d2-d3)/c;
t12_=t12+(t12*0.01);
t13_=t13+(t13*0.01);
t23_=t23+(t23*0.01);
%Inicialización de la posición de las partículas

indice = 1;
for i = 1 : 7
    for j = 1 : 7
        enjambre(indice, 1, 1) = i+2;
        enjambre(indice, 1, 2) = j+3;
        indice = indice + 1;
    end
end

%Mejor valor de la función objetivo hasta el momento
enjambre(:, 4, 1) = 1000;

%Inicialización de la velocidad
enjambre(:, 2, :) = 0;

temp=4;
k=0;
while (temp>1e-9)
    k=k+1;
    %Cálculo de la nueva posición de la partícula y del valor de la
    función objetivo para la misma
```

```
for i = 1 : tam_enjambre
    %Actualización de la posición (componente x)
    enjambre(i, 1, 1) = enjambre(i, 1, 1) + enjambre(i, 2, 1)/1.3;
    %Actualización de la posición (componente y)
    enjambre(i, 1, 2) = enjambre(i, 1, 2) + enjambre(i, 2, 2)/1.3;
    x = enjambre(i, 1, 1);
    y = enjambre(i, 1, 2);

    P=[x y];

    d1=norm(A1-P);
    d2=norm(A2-P);
    d3=norm(A3-P);

    %Función objetivo a minimizar
    val=((t12_*c)-(d1-d2))^2+((t13_*c)-(d1-d3))^2+((t23_*c)-(d2-
d3))^2;

    %Si la nueva posición es mejor, se actualiza el valor de la
mejor
    %posición x, la mejor posición y y el valor de la función
objetivo
    if val < enjambre(i, 4, 1)
        enjambre(i, 3, 1) = enjambre(i, 1, 1);
        enjambre(i, 3, 2) = enjambre(i, 1, 2);
        enjambre(i, 4, 1) = val;
    end
end

% Mejor posición global
[temp,pmejor] = min(enjambre(:, 4, 1));

valorfinal(k)=temp;
%Actualización de la velocidad
for i = 1 : tam_enjambre
    %Velocidad (componente x)
    enjambre(i, 2, 1) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 1)
+factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1));
    %Velocidad (componente y)
    enjambre(i, 2, 2) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 2) +
factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2));
end

%Visualización del enjambre
clf
%Dibujo de cada movimiento
plot(enjambre(:, 1, 1),enjambre(:, 1, 2), 'x')
axis([-2 10 -2 10]);
pause(.2)
end

figure
niter=1:1:k;
plot(niter,valorfinal);
```

```
xlabel('n° iteraciones');  
ylabel('temp');
```

## Código 11(capítulo 8)

```
clear all  
clc  
inercia =1;  
factor_correccion =2;  
tam_enjambre = 49;  
c=3e8;  
A1=[-1 0];  
A2=[0 1];  
A3=[0 -1];  
A4=[1 0];  
% TDOAs reales  
t12=-0.2e-9;  
t13=0.3e-9;  
t14=0.1e-9;  
t23=0.4e-9;  
t24=0.3e-9;  
t34=-0.2e-9;  
  
%Inicialización de la posición de las partículas  
  
indice = 1;  
for i = 1 : 7  
    for j = 1 : 7  
        enjambre(indice, 1, 1) = i+2;  
        enjambre(indice, 1, 2) = j+3;  
        indice = indice + 1;  
    end  
end  
  
%Mejor valor de la función objetivo hasta el momento  
enjambre(:, 4, 1) = 1000;  
  
%Inicialización de la velocidad  
enjambre(:, 2, :) = 0;  
k=0;  
temp=4;  
while (temp>1e-3)  
    k=k+1  
  
    %Cálculo de la nueva posición de la partícula y del valor de la  
    función objetivo para la misma  
    for i = 1 : tam_enjambre  
        %Actualización de la posición (componente x)  
        enjambre(i, 1, 1) = enjambre(i, 1, 1) + enjambre(i, 2, 1)/1.3;  
        %Actualización de la posición (componente y)  
        enjambre(i, 1, 2) = enjambre(i, 1, 2) + enjambre(i, 2, 2)/1.3;  
        x = enjambre(i, 1, 1);  
        y = enjambre(i, 1, 2);  
  
        P=[x y];
```

```
d1=norm(A1-P);
d2=norm(A2-P);
d3=norm(A3-P);
d4=norm(A4-P);
%Función objetivo a minimizar
val=((t12*c)-(d1-d2))^2+((t13*c)-(d1-d3))^2+((t23*c)-(d2-
d3))^2+((t14*c)-(d1-d4))^2+((t24*c)-(d2-d4))^2+((t34*c)-(d3-d4))^2;

%Si la nueva posición es mejor, se actualiza el valor de la
mejor
%posición x, la mejor posición y y el valor de la función
objetivo
if val < enjambre(i, 4, 1)
    enjambre(i, 3, 1) = enjambre(i, 1, 1);
    enjambre(i, 3, 2) = enjambre(i, 1, 2);
    enjambre(i, 4, 1) = val;
end
end

% Mejor posición global
[temp,pmejor] = min(enjambre(:, 4, 1));
enjambre
temp

%Actualización de la velocidad
for i = 1 : tam_enjambre
    %Velocidad (componente x)
    enjambre(i, 2, 1) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 1)
+factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1));
    %Velocidad (componente y)
    enjambre(i, 2, 2) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 2) +
factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2));
end

%Visualización del enjambre
clf
%Dibujo de cada movimiento
plot(enjambre(:, 1, 1),enjambre(:, 1, 2), 'x')
axis([-2 10 -2 10]);
pause(.2)
end

xs=enjambre(pmejor,3,1)
ys=enjambre(pmejor,3,2)
```

## Código 12(capítulo 8)

```
close all
clear all
clc
inercia =1;
factor_correccion =1;
```

```
tam_enjambre = 343;
c=3e8;
A1=[-1,0,0.15]
A2=[0,1,0.15]
A3=[0,0,0.15]
A4=[1,0,0.15]
% Diferencias de tiempos de llegada de la DP entre antenas
t12=-0.2e-9;
t13=0.3e-9;
t14=0.1e-9;
t23=0.4e-9;
t24=0.3e-9;
t34=-0.2e-9;
%Inicialización de la posición de las partículas

indice = 1;
for i = 1 : 7
    for j = 1 : 7
        for m = 0.1 :0.1: 0.7

            enjambre(indice, 1, 1) = i+2;
            enjambre(indice, 1, 2) = j+3;
            enjambre(indice, 1, 3) = m+1;
            indice = indice + 1;

        end
    end
end

%Mejor valor de la función objetivo hasta el momento
enjambre(:, 4, 1) = 1000;

%Inicialización de la velocidad
enjambre(:, 2, :) = 0;
enjambre
k=0;
temp=4;
while (temp>0.001)
    k=k+1

    %Cálculo de la nueva posición de la partícula y del valor de la
    función objetivo para la misma
    for i = 1 : tam_enjambre
        %Actualización de la posición (componente x)
        enjambre(i, 1, 1) = enjambre(i, 1, 1) + enjambre(i, 2, 1)/1.3;
        %Actualización de la posición (componente y)
        enjambre(i, 1, 2) = enjambre(i, 1, 2) + enjambre(i, 2, 2)/1.3;
        %Actualización de la posición (componente z)
        enjambre(i, 1, 3) = enjambre(i, 1, 3) + enjambre(i, 2, 3)/1.3;

        x = enjambre(i, 1, 1);
        y = enjambre(i, 1, 2);
        z = enjambre(i, 1, 3);
        P=[x y z];

        d1=norm(A1-P);
```

```
d2=norm(A2-P);
d3=norm(A3-P);
d4=norm(A4-P);

%Función objetivo a minimizar
val=((t12*c)-(d1-d2))^2+((t13*c)-(d1-d3))^2+((t23*c)-(d2-
d3))^2+((t14*c)-(d1-d4))^2+((t24*c)-(d2-d4))^2+((t34*c)-(d3-d4))^2;

%Si la nueva posición es mejor, se actualiza el valor de la
mejor
%posición x, la mejor posición y y el valor de la función
objetivo
if val < enjambre(i, 4, 1)
    enjambre(i, 3, 1) = enjambre(i, 1, 1);
    enjambre(i, 3, 2) = enjambre(i, 1, 2);
    enjambre(i, 3, 3) = enjambre(i, 1, 3);
    enjambre(i, 4, 1) = val;
end
end

% Mejor posición global
[temp,pmejor] = min(enjambre(:, 4, 1));
enjambre
temp

%Actualización de la velocidad
for i = 1 : tam_enjambre
    %Velocidad (componente x)
    enjambre(i, 2, 1) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 1)
+factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 1) - enjambre(i, 1, 1));
    %Velocidad (componente y)
    enjambre(i, 2, 2) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 2) +
factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 2) - enjambre(i, 1, 2));
    %Velocidad (componente z)
    enjambre(i, 2, 3) = rand*inercia*enjambre(i, 2, 3) +
factor_correccion*rand*(enjambre(i, 3, 3) - enjambre(i, 1, 3)) +
factor_correccion*rand*(enjambre(pmejor, 3, 3) - enjambre(i, 1, 3));

end

%Visualización del enjambre
clf
%Dibujo de cada movimiento
plot(enjambre(:, 1, 1),enjambre(:, 1, 2), 'x')
%    axis([-2 10 -2 10]);
pause(.2)
end

xs=enjambre(pmejor,3,1)
ys=enjambre(pmejor,3,2)
```

## Bibliografía

- Albarracín Sánchez, Ricardo (2014): *Medida de descargas parciales en radiofrecuencia*, (tesis doctoral), Madrid, Universidad Carlos III de Madrid.
- CCIR/ITESM, Departamento de Matemáticas (2009): *Métodos iterativos para resolver sistemas lineales*, [disponible en línea]  
<<http://www.mty.itesm.mx/dmti/materias/ma2008/lecturas/ma2008-09a.pdf>>, [ref. 24-4-2015].
- Cortes Cherta, Manuel (1994): *Curso Moderno de Máquinas Eléctricas Rotativas*, Barcelona, Reverté.
- Kennedy, James & Eberhart, Russel (1995): «A New Optimizer Using Particle Swarm Theory», en *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39-43.
- Linealt (Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión), Universidad Carlos III de Madrid (2008): *Introducción a las descargas parciales*, [disponible en línea], <[http://electronica.uc3m.es/~linealt/Documentos/descargas\\_parciales.pdf](http://electronica.uc3m.es/~linealt/Documentos/descargas_parciales.pdf)>, [ref. 15-2-2015]
- Markalous, Sacha M. & Tenbohlen, Stefan & Feser, Kurt (2008): «Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetics Signals», en *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 15, 6, 1576-1583.
- Martínez, Yaiza (2013): «La inteligencia de los enjambres mejorará el comportamiento colectivo de las máquinas», en *Tendencias 21*, [disponible en línea] <[http://www.tendencias21.net/La-inteligencia-de-los-enjambres-mejorara-el-comportamiento-colectivo-de-las-maquinas\\_a16212.html](http://www.tendencias21.net/La-inteligencia-de-los-enjambres-mejorara-el-comportamiento-colectivo-de-las-maquinas_a16212.html)> [ref. 10-5-2015].
- Moore, Philip J. & Portugues, Iliana E. & Glover, Ian A. (2005): «Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant», en *IEEE Transactions on power delivery*, vol 20, 3, 2264-2272.



- Pérez López, Jesús Ramón (2005): *Contribución a los métodos de optimización basados en procesos naturales y su aplicación a la medida de antenas en campo próximo*, (tesis doctoral), Santander, Universidad de Cantabria.
- Riojas Cañari, Alicia Cirila (2005): «Heurística y metaheurística», *Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas*, Lima.
- Robles, Guillermo & Fresno, José Manuel & Martínez-Tarifa, Juan Manuel (2015): «Separation of Radio-Frequency sources and Localization of Partial Discharges in Noisy Environments», en *Sensors*, 15, 9882-9898.
- Soria, E. & Martínez, M. & Francés, J.V. & Camps, G. (2003): *Tratamiento digital de señales. Problemas y ejercicios resueltos*, Madrid, Pearson Educación.
- Wagenaars, P. & Wouters, P.A.A.F & Van der Wielen, P.C.J.M & Steennis, E.F (2008):«Accurate Estimation of the Time-of-Arrival of Partial Discharge Pulses in Cable Systems in Service», en *IEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 15, 4, 1190-1199.